



**T.C.**  
**TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**  
**TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI**  
**DOKTORA PROGRAMI**

**FARKLI pH'LI TOPRAKLARA UYGULANAN FOSFORLU**  
**GÜBRELERLE ORGANİK MATERYALLERİN FOSFOR**  
**ADSORBSİYONU, BAZI MİKRO BESİN MADDELERİNİN**  
**DEĞİŞİMİ VE BİYOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Yağmur KAYA**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rasim Koçyiğit**

**TOKAT - 2025**

## ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Rasim KOÇYİĞİT danışmanlığında hazırlamış olduğum “Farklı pH’lı Topraklara Uygulanan Fosforlu Gübrelerle Organik Materyallerin Fosfor Adsorbsiyonu, Bazı Mikro Besin Maddelerinin Değişimi ve Biyolojik Özelliklere Etkileri” adlı Doktora tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

24/06/2025

Yağmur KAYA



### JÜRİ KABUL VE ONAY

**YAĞMUR KAYA** tarafından hazırlanan “**Farklı pH’lı Topraklara Uygulanan Fosforlu Gübrelerle Organik Materyallerin Fosfor Adsorbsiyonu, Bazı Mikro Besin Maddelerinin Değişimi ve Biyolojik Özelliklere Etkileri**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 24 Haziran 2025 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Toprak Bilimi Ve Bitki Besleme Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)**

**İmza**

Üye (Başkan):

Danışman:

Üye:

Üye:

Üye:

ONAY

...../...../.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## ÖNSÖZ



**Bu tez çalışması;**

**Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından 2022/48 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.**

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bilimsel anlamda yol göstericim olan, titiz ve disiplinli çalışmasıyla bana örnek olan, tez konumun belirlenmesinden itibaren çalışmalarımı dikkatle takip ve koordine eden ve beni akademik yönde şekillendiren danışman hocam Prof. Dr. Rasim KOÇYİĞİT'e, TİK üyeleri olarak tez çalışmama yaptıkları her türlü katkılarından dolayı Prof. Dr. Sonay SÖZÜDOĞRU OK'a, Prof. Dr. İrfan OĞUZ'a ve tüm bölüm hocalarıma, hayatımın her aşamasında olduğu gibi doktora sürecim boyunca da yanımda olan, evlatları olmaktan her zaman gurur duyduğum sevgili annem Türkan KAYA'ya, babam Nedim KAYA'ya ve kardeşi olmaktan gurur duyduğum ağabeyim Anıl KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yağmur KAYA  
24 Haziran 2024

## ÖZET

### FARKLI pH'LI TOPRAKLARA UYGULANAN FOSFORLU GÜBRELERLE ORGANİK MATERYALLERİN FOSFOR ADSORBSİYONU, BAZI MİKRO BESİN MADDELERİNİN DEĞİŞİMİ VE BİYOLOJİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİ

Kaya, Yağmur

Doktora, Toprak Bilimi Ve Bitki Besleme Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rasim Koçyiğit

Haziran 2025, xxv + 282 sayfa

Bu çalışma, farklı pH'ya sahip topraklarda fosforlu gübrelerin (TSP ve ham kaya fosfat) çeşitli organik materyallerle (biochar, vermikompost, ahır gübresi) birlikte uygulanmasının toprakta fosfor adsorpsiyon kapasitesi, mikro besin elementlerinin yayılgılığı ve biyolojik özellikler üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamıştır. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesinde yürütülen bu araştırma, asidik, nötr ve bazik özellik gösteren üç farklı toprak tipinde, iki fosforlu gübre ve üç organik materyal kombinasyonu kullanılarak yürütülmüş, hem inkübasyon hem de saksı denemeleriyle desteklenmiştir. Araştırmada elde edilen bulgular, fosforlu gübrelerin organik materyallerle birlikte uygulanmasının toprakta hem toplam hem de inorganik fosfor miktarını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Özellikle ahır gübresi ve vermikompost uygulamaları, mikrobiyal aktiviteyi ve enzimatik süreçleri teşvik etmiş ve bu sayede, fosforun yayılgılığını önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca kullanılan bu organik materyaller, toprağın organik maddesini ve özellikle inorganik azot seviyelerini yükselterek toprağın verimlilik potansiyelini arttırmıştır. pH'nın fosforun alınabilirliği üzerindeki etkisi belirgin olmuş, asidik topraklarda ham kaya fosfat ve ahır gübresi kombinasyonu pH'yı artırarak fosfor alımını kolaylaştırırken, bazik topraklarda biochar'ın pH'yı daha da yükselterek bazı durumlarda fosforun fiksasyonuna neden olduğu gözlenmiştir. Araştırma bulgularına göre, asidik, nötr ve bazik reaksiyonlu topraklarda fosfor adsorpsiyon kapasitesi, tüm toprak tiplerinde fosfor adsorpsiyonunun 1. saatten itibaren hızla arttığını ve 3. günde maksimum düzeye ulaştığını, ardından 5. ve 7. günlerde bu artışın yavaşladığını ortaya koymuştur. Çalışmada yapılan uygulamaların, mikro elementler üzerine de önemli etkileri olduğu görülmüş ve özellikle HKF+Vermikompost ve HKF+Ahır gübresi uygulamalarının, Zn, Fe, Mn ve Cu elementlerinin alınabilir formlarını artırarak topraktaki yayılgılığını arttırdığı gözlenmiştir. Ayrıca, toprakların mikrobiyal biyokütle (MBC), dehidrogenaz (DHA) ve fosfotaz enzim aktiviteleri,

uygulanan fosforlu gübrelerin organik materyallerle birlikte kullanımına baēlı olarak önemli düzeyde artış göstermiştir. Özellikle HKF+Ahır ve HKF+Vermikompost uygulamaları, tüm toprak reaksiyonlarında MBC ve enzim aktivitelerinde en yüksek deēerlere ulaşmıştır. Sonuç olarak, toprak saēlıēının geliştirilmesi ve fosfor kullanımının etkinliēinin arttırılması açısından fosforlu gübrelerin organik materyallerle uygulamaları, tarımda sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar saēlamaktadır. Toprak pH'sı, fosfor formu ve organik materyal türü dikkate alınarak yapılan bu kombinasyonlar, fosforun bitkiye yarıyışlı hale gelmesini artırmakta, mikro besin elementlerinin hareketliliēini desteklemekte ve toprak biyolojik özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Biochar, Fosforlu Gübre, Vermikompost, Ahır Gübresi, Mikrobiyal Biuoktle, Enzim

## **ABSTRACT**

### **THE EFFECTS OF PHOSPHORUS FERTILIZERS AND ORGANIC MATERIALS UNDER DIFFERENT SOIL pH ON PHOSPHORUS ADSORPTION, CHANGES IN SOME MICRONUTRIENTS AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS**

Kaya, Yağmur

PhD Thesis, Department of Soil Science and Plant Nutrition

Advisor: Prof. Dr. Rasim Koçyiğit

June 2025, xxv + 282 pages

This study aimed to determine the effects of phosphorus fertilizers (TSP and ground crude rock phosphate (GRP)) in combination with various organic materials (biochar, vermicompost, farmyard manure) on phosphorus adsorption capacity, micronutrient availability and biological properties in soils with different pH. This research was conducted at Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Agriculture, using two phosphorus fertilizers and three organic material combinations in three different soil types with acidic, neutral and basic properties, and supported by both incubation and pot trials. The findings of the study show that the application of phosphorus fertilizers in combination with organic materials significantly increases the amount of both total and inorganic phosphorus in the soil. In particular, farmyard manure and vermicompost applications promoted microbial activity and enzymatic processes, thereby significantly increasing the availability of phosphorus. In addition, these organic materials increased soil fertility by increasing soil organic matter and especially inorganic nitrogen levels. The effect of pH on phosphorus uptake was significant; in acidic soils, the combination of ground rock phosphate and farmyard manure increased pH and facilitated phosphorus uptake, while in basic soils, biochar further increased pH and in some cases caused fixation of phosphorus. According to the research findings, phosphorus adsorption capacity in acid, neutral and basic reaction soils revealed that phosphorus adsorption in all soil types increased rapidly from the 1st hour and reached the maximum level on the 3rd day, then this increase slowed down on the 5th and 7th days. It was observed that the treatments also had significant effects on microelements and especially GRP+Vermicompost and GRP+Farm treatments increased the availability of Zn, Fe, Mn and Cu in the soil by increasing their available forms. In addition, microbial biomass (MBC), dehydrogenase (DHA) and phosphatase enzyme activities of soils increased significantly due to the use of applied phosphorus fertilizers together with organic

materials. Especially, GRP+Farm and GRP+Vermicompost treatments reached the highest values in MBC and enzyme activities in all soil reactions. In conclusion, in terms of improving soil health and increasing the efficiency of phosphorus utilization, applications of phosphorus fertilizers with organic materials provide important advantages in terms of sustainability in agriculture. These combinations, considering soil pH, phosphorus form and organic material type, increase the availability of phosphorus to plants, support the mobility of micronutrients and positively affect soil biological properties. In this respect, the study sheds light on new strategies for phosphorus fertilization and the contribution of organic materials.

**Keywords:** Biochar, Phosphorus Fertilizer, Vermicompost, Farmyard Manure, Microbial Biomass, Enzyme

## İÇİNDEKİLER

|                                                                          | <b><u>Sayfa</u></b> |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| ETİK SÖZLEŞME .....                                                      | ii                  |
| JÜRİ KABUL VE ONAY .....                                                 | iii                 |
| ÖNSÖZ .....                                                              | iv                  |
| TEŞEKKÜR .....                                                           | v                   |
| ÖZET .....                                                               | vi                  |
| ABSTRACT .....                                                           | viii                |
| İÇİNDEKİLER.....                                                         | x                   |
| SİMGE ve KISALTMALAR .....                                               | xiii                |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                     | xv                  |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                       | xxii                |
| 1. GİRİŞ .....                                                           | 1                   |
| 2. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....                                               | 8                   |
| 2.1. Fosforlu Gübrelerin (TSP ve Kaya Fosfat) Etkinliği .....            | 8                   |
| 2.2. Organik Materyallerin Etkinliği .....                               | 18                  |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM.....                                               | 67                  |
| 3.1. Materyal .....                                                      | 67                  |
| 3.1.1. Deneme materyali .....                                            | 67                  |
| 3.1.2. Deneme planı .....                                                | 69                  |
| 3.2. Yöntem.....                                                         | 69                  |
| 1.1.1. Çalışmada yapılan analizler .....                                 | 69                  |
| 1.1.2. Bitki analizleri .....                                            | 72                  |
| 1.1.3. İstatistiksel analizler .....                                     | 72                  |
| 4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....                                            | 74                  |
| 4.1. Toprak inkübasyon denemesi .....                                    | 74                  |
| 4.1.1. Toprak pH sonuçları ve istatistiksel veriler .....                | 74                  |
| 4.1.2. Toprak EC sonuçları ve istatistiksel veriler .....                | 78                  |
| 4.1.3. Toprak kireç sonuçları ve istatistiksel veriler .....             | 82                  |
| 4.1.4. Toprak organik madde analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .. | 86                  |
| 4.1.5. Toprak inorganik N analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...  | 90                  |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.6. Toprak toplam P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....                   | 94  |
| 4.1.7. Toprak inorganik P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler....                  | 98  |
| 4.1.8. Toprak organik P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler.....                   | 102 |
| 4.1.9. Toprak fosfor adsorpsiyonu kinetiği .....                                         | 106 |
| 4.1.10. Toprakta ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....  | 113 |
| 4.1.11. Toprakta ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ..... | 117 |
| 4.1.12. Toprakta ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ..... | 121 |
| 4.1.13. Toprakta alınabilir Fe analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 125 |
| 4.1.14. Toprakta alınabilir Zn analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 128 |
| 4.1.15. Toprakta alınabilir Cu analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 131 |
| 4.1.16. Toprakta alınabilir Mn analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 134 |
| 4.1.17. Toprakta alınabilir B analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....            | 137 |
| 4.1.18. Toprak mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....      | 140 |
| 4.1.19. Toprak fosfataz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 143 |
| 4.1.20. Toprak dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....       | 146 |
| 4.2. Bitki denemesi analiz sonuçları .....                                               | 149 |
| 4.2.1. Toprak pH sonuçları ve istatistiksel veriler .....                                | 149 |
| 4.2.2. Toprak EC sonuçları ve istatistiksel veriler .....                                | 153 |
| 4.2.3. Toprak kireç sonuçları ve istatistiksel veriler .....                             | 157 |
| 4.2.4. Toprak organik madde analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...                | 160 |
| 4.2.5. Toprak inorganik N analiz sonuçları ve istatistiksel veriler...                   | 163 |
| 4.2.6. Toprak toplam P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler.....                    | 166 |
| 4.2.7. Toprak inorganik P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler....                  | 169 |
| 4.2.8. Toprak organik P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler.....                   | 172 |
| 4.2.9. Toprak fosfor adsorpsiyonu kinetiği .....                                         | 175 |
| 4.2.10. Toprakta ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....  | 181 |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.11. Toprakta ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ..... | 184 |
| 4.2.12. Toprakta ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ..... | 187 |
| 4.2.13. Toprakta alınabilir Fe analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 190 |
| 4.2.14. Toprakta alınabilir Zn analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 193 |
| 4.2.15. Toprakta alınabilir Cu analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 196 |
| 4.2.16. Toprakta alınabilir Mn analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 199 |
| 4.2.17. Toprakta alınabilir B analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....            | 202 |
| 4.2.18. Toprak mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....      | 205 |
| 4.2.19. Toprak fosfataz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel veriler ...             | 208 |
| 4.2.20. Toprak dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel veriler .....       | 212 |
| 4.3. Mısır bitkisinin besin elementi içerikleri .....                                    | 215 |
| 4.3.1. Mısır bitkisinin yaş ve kuru ağırlık ortalamaları .....                           | 216 |
| 4.3.2. Mısır bitkisinin azot içeriği .....                                               | 218 |
| 4.3.3. Mısır bitkisinin fosfor içeriği .....                                             | 222 |
| 4.3.4. Mısır bitkisinin potasyum içeriği .....                                           | 225 |
| 4.3.5. Mısır bitkisinin kalsiyum içeriği .....                                           | 229 |
| 4.3.6. Mısır bitkisinin magnezyum içeriği .....                                          | 232 |
| 4.3.7. Mısır bitkisinin demir içeriği .....                                              | 235 |
| 4.3.8. Mısır bitkisinin çinko içeriği .....                                              | 238 |
| 4.3.9. Mısır bitkisinin bakır içeriği .....                                              | 241 |
| 4.3.10. Mısır bitkisinin mangan içeriği .....                                            | 244 |
| 4.3.11. Mısır bitkisinin bor içeriği .....                                               | 247 |
| 5. SONUÇ.....                                                                            | 250 |
| KAYNAKLAR .....                                                                          | 254 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                           | 282 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR

| Simgeler        | Açıklama         |
|-----------------|------------------|
| °C              | Santigrat derece |
| %               | Yüzde            |
| m <sup>2</sup>  | Metrekare        |
| cm <sup>2</sup> | Santimetrekare   |

| Kısaltmalar    | Açıklama               |
|----------------|------------------------|
| cm             | Santimetre             |
| mm             | Milimetre              |
| da             | Dekar                  |
| ha             | Hektar                 |
| g              | Gram                   |
| mg             | Miligram               |
| kg             | Kilogram               |
| l              | Litre                  |
| ml             | Mililitre              |
| N              | Azot                   |
| P              | Fosfor                 |
| P <sub>T</sub> | Toplam Fosfor          |
| P <sub>i</sub> | İnorganik Fosfor       |
| P <sub>o</sub> | Organik Fosfor         |
| K              | Potasyum               |
| EC             | Elektriksel iletkenlik |
| HKF            | Ham Kaya Fosfat        |
| TSP            | Triple süper fosfat    |
| Cu             | Bakır                  |
| Zn             | Çinko                  |

|    |           |
|----|-----------|
| B  | Bor       |
| Fe | Demir     |
| Mg | Magnezyum |
| Mn | Manganez  |



## ÇİZELGE LİSTESİ

| <u>Çizelge</u> |                                                                                              | <u>Sayfa</u> |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Çizelge 3.1.   | Deneme kullanılan topraklarının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri .....                  | 67           |
| Çizelge 3.2.   | Deneme planı ve yapılan uygulamalar .....                                                    | 69           |
| Çizelge 4.1.   | İnkübasyon topraklarının pH analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler. ....            | 75           |
| Çizelge 4.2.   | İnkübasyon topraklarının pH analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                  | 77           |
| Çizelge 4.3.   | İnkübasyon topraklarının EC analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....            | 79           |
| Çizelge 4.4.   | İnkübasyon topraklarının EC analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                  | 81           |
| Çizelge 4.5.   | İnkübasyon topraklarının kireç analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....         | 84           |
| Çizelge 4.6.   | İnkübasyon topraklarının kireç analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....               | 85           |
| Çizelge 4.7.   | İnkübasyon topraklarının organik madde analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ..... | 87           |
| Çizelge 4.8.   | İnkübasyon topraklarının organik madde analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....       | 89           |
| Çizelge 4.9.   | İnkübasyon topraklarının azot analizi sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....         | 91           |
| Çizelge 4.10.  | İnkübasyon topraklarının azot analizi sonuçları ve istatistiksel gruplar .....               | 93           |
| Çizelge 4.11.  | İnkübasyon topraklarının toplam P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....      | 95           |
| Çizelge 4.12.  | İnkübasyon topraklarının toplam P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....            | 97           |
| Çizelge 4.13.  | İnkübasyon topraklarının inorganik P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....   | 99           |

|               |                                                                                                        |     |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.14. | İnkübasyon topraklarının inorganik P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                   | 101 |
| Çizelge 4.15. | İnkübasyon topraklarının organik P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....               | 103 |
| Çizelge 4.16. | İnkübasyon topraklarının organik P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                     | 105 |
| Çizelge 4.17. | Toprak inkübasyon denemesi asidik toprakların fosfor adsorpsiyonu analiz sonuçları .....               | 106 |
| Çizelge 4.18. | Toprak inkübasyon denemesi nötr toprakların fosfor adsorpsiyonu analiz sonuçları .....                 | 109 |
| Çizelge 4.19. | Toprak inkübasyon denemesi bazik toprakların fosfor adsorpsiyonu analiz sonuçları.....                 | 111 |
| Çizelge 4.20. | İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....  | 114 |
| Çizelge 4.21. | İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....        | 116 |
| Çizelge 4.22. | İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ..... | 118 |
| Çizelge 4.23. | İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....       | 120 |
| Çizelge 4.24. | İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ..... | 122 |
| Çizelge 4.25. | İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....       | 124 |
| Çizelge 4.26. | İnkübasyon topraklarının alınabilir Fe analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....           | 126 |
| Çizelge 4.27. | İnkübasyon topraklarının alınabilir Fe analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                 | 127 |
| Çizelge 4.28. | İnkübasyon topraklarının alınabilir Zn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....           | 129 |
| Çizelge 4.29. | İnkübasyon topraklarının alınabilir Zn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                 | 130 |

|               |                                                                                                     |     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.30. | İnkübasyon topraklarının alınabilir Cu analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....        | 132 |
| Çizelge 4.31. | İnkübasyon topraklarının alınabilir Cu analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....              | 133 |
| Çizelge 4.32. | İnkübasyon topraklarının alınabilir Mn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....        | 135 |
| Çizelge 4.33. | İnkübasyon topraklarının alınabilir Mn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....              | 136 |
| Çizelge 4.34. | İnkübasyon topraklarının alınabilir B analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....         | 138 |
| Çizelge 4.35. | İnkübasyon topraklarının alınabilir B analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....               | 139 |
| Çizelge 4.36. | İnkübasyon topraklarının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ..... | 141 |
| Çizelge 4.37. | İnkübasyon topraklarının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....       | 142 |
| Çizelge 4.38. | İnkübasyon topraklarının fosfotaz enzimi analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....      | 144 |
| Çizelge 4.39. | İnkübasyon topraklarının fosfataz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....            | 145 |
| Çizelge 4.40. | İnkübasyon topraklarının dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....  | 147 |
| Çizelge 4.41. | İnkübasyon topraklarının dehidrogenaz enzim analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....         | 148 |
| Çizelge 4.42. | Bitki denemesi topraklarının pH sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....                      | 150 |
| Çizelge 4.43. | Bitki denemesi topraklarının pH sonuçları istatistiksel gruplar .....                               | 152 |
| Çizelge 4.44. | Bitki denemesi topraklarının EC sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....                      | 155 |
| Çizelge 4.45. | Bitki denemesi topraklarının EC sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                            | 156 |

|               |                                                                                                           |     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.46. | Bitki denemesi topraklarının kireç sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....                         | 158 |
| Çizelge 4.47. | Bitki denemesi topraklarının kireç sonuçları istatistiksel gruplar .....                                  | 159 |
| Çizelge 4.48. | Bitki denemesi topraklarının organik madde sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....                 | 161 |
| Çizelge 4.49. | Bitki denemesi topraklarının organik madde sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                       | 162 |
| Çizelge 4.50. | Bitki denemesi çalışması topraklarının azot analizi sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....        | 164 |
| Çizelge 4.51. | Bitki denemesi topraklarının azot analizi sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                        | 165 |
| Çizelge 4.52. | Bitki denemesi topraklarının toplam P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....               | 167 |
| Çizelge 4.53. | Bitki denemesi topraklarının toplam P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                     | 168 |
| Çizelge 4.54. | Bitki denemesi topraklarının inorganik P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....            | 170 |
| Çizelge 4.55. | Bitki denemesi topraklarının inorganik P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                  | 171 |
| Çizelge 4.56. | Bitki denemesi topraklarının organik P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....              | 173 |
| Çizelge 4.57. | Bitki denemesi topraklarının organik P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                    | 174 |
| Çizelge 4.58. | Bitki denemesi asidik toprakta fosfor adsorpsiyon sonuçları .                                             | 175 |
| Çizelge 4.59. | Bitki denemesi nötr toprakta fosfor adsorpsiyon sonuçları ....                                            | 177 |
| Çizelge 4.60. | Bitki denemesi bazik toprakta fosfor adsorpsiyon sonuçları ...                                            | 179 |
| Çizelge 4.61. | Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ..... | 182 |
| Çizelge 4.62. | Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....       | 183 |

|               |                                                                                                            |     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.63. | Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ..... | 185 |
| Çizelge 4.64. | Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....       | 186 |
| Çizelge 4.65. | Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ..... | 188 |
| Çizelge 4.66. | Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....       | 189 |
| Çizelge 4.67. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir Fe analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....           | 191 |
| Çizelge 4.68. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir Fe analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                 | 192 |
| Çizelge 4.69. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir Zn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....           | 194 |
| Çizelge 4.70. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir Zn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                 | 195 |
| Çizelge 4.71. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir Cu analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....           | 197 |
| Çizelge 4.72. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir Cu analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                 | 198 |
| Çizelge 4.73. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir Mn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....           | 200 |
| Çizelge 4.74. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir Mn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                 | 201 |
| Çizelge 4.75. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir B analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....            | 203 |
| Çizelge 4.76. | Bitki denemesi topraklarının alınabilir B analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                  | 204 |
| Çizelge 4.77. | Bitki denemesi topraklarının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....    | 206 |
| Çizelge 4.78. | Bitki denemesi topraklarının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....          | 207 |

|                |                                                                                                        |     |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 4.79.  | Bitki denemesi topraklarının fosfataz enzimi analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....     | 209 |
| Çizelge 4.80.  | Bitki denemesi topraklarının fosfataz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....           | 210 |
| Çizelge 4.81.  | Bitki denemesi topraklarının dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ..... | 213 |
| Çizelge 4.82.  | Bitki denemesi topraklarının dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....       | 214 |
| Çizelge 4.83.  | Mısır bitkisinin (yeşil gövde kuru maddesi için) besin elementi sınır değerleri .....                  | 215 |
| Çizelge 4.84.  | Farklı toprak reaksiyonları ve uygulamalarda mısır bitkisinin yaş ağırlık ortalamaları .....           | 216 |
| Çizelge 4.85.  | Farklı toprak reaksiyonları ve uygulamalarda mısır bitkisinin kuru ağırlık ortalamaları .....          | 276 |
| Çizelge 4.86.  | Mısır bitkisi % N analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.....                                 | 219 |
| Çizelge 4.87.  | Mısır bitkisinin % N analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .                                       | 220 |
| Çizelge 4.88.  | Mısır bitkisi P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler ...                                    | 223 |
| Çizelge 4.89.  | Mısır bitkisinin P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                                     | 224 |
| Çizelge 4.90.  | Mısır bitkisi K analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .                                      | 226 |
| Çizelge 4.91.  | Mısır bitkisinin K analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                                     | 227 |
| Çizelge 4.92.  | Mısır bitkisi Ca analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.                                      | 230 |
| Çizelge 4.93.  | Mısır bitkisinin Ca analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ....                                     | 231 |
| Çizelge 4.94.  | Mısır bitkisi Mg analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler                                       | 233 |
| Çizelge 4.95.  | Mısır bitkisinin Mg analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ....                                     | 234 |
| Çizelge 4.96.  | Mısır bitkisi Fe analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler..                                     | 236 |
| Çizelge 4.97.  | Mısır bitkisinin Fe analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                                    | 237 |
| Çizelge 4.98.  | Mısır bitkisi Zn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.                                      | 239 |
| Çizelge 4.99.  | Mısır bitkisinin Zn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar .....                                    | 240 |
| Çizelge 4.100. | Mısır bitkisi Cu analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler .....                                 | 242 |

|         |                                                                  |     |
|---------|------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge | Mısır bitkisinin Cu analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar    |     |
| 4.101.  | .....                                                            | 243 |
| Çizelge | Mısır bitkisi Mn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler |     |
| 4.102.  | .....                                                            | 245 |
| Çizelge | Mısır bitkisinin Mn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar    |     |
| 4.103.  | .....                                                            | 246 |
| Çizelge | Mısır bitkisi B analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler  |     |
| 4.104.  | .....                                                            | 248 |
| Çizelge | Mısır bitkisinin B analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar     |     |
| 4.105.  | .....                                                            | 249 |

## ŞEKİL LİSTESİ

| <u>Şekil</u> |                                                                                    | <u>Sayfa</u> |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4.1.   | İnkübasyon denemesi asidik toprağın fosfor adsorpsiyonu kapasitesi ( $q_e$ ) ..... | 107          |
| Şekil 4.2.   | İnkübasyon denemesi nötr toprağın fosfor adsorpsiyonu kapasitesi ( $q_e$ ) .....   | 109          |
| Şekil 4.3.   | İnkübasyon denemesi bazık toprağın fosfor adsorpsiyonu kapasitesi ( $q_e$ ) .....  | 111          |
| Şekil 4.4.   | Bitki denemesi asidik toprağın fosfor adsorpsiyonu kapasitesi ( $q_e$ ) .....      | 175          |
| Şekil 4.5.   | Bitki denemesi nötr toprağın fosfor adsorpsiyonu kapasitesi ( $q_e$ ) .....        | 177          |
| Şekil 4.6.   | Bitki denemesi bazık toprağın fosfor adsorpsiyonu kinetiği ( $q_e$ ) .....         | 198          |

## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun sürekli olarak artmasına rağmen tarım arazilerinin ve hammadde kaynaklarının artma olasılığı yoktur. Bu nedenle tarım arazilerinin sürdürülebilir bir yönetim anlayışıyla kullanılması zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Birçok Avrupa ülkesi gibi ülkemizin de geleceğe yönelik kalkınma planları arasında küresel iklim değişikliği ile mücadele ve yerel kaynakların sürdürülebilirliğini sağlamak vardır. Bu hususta yapılacakların temeli olarak “yeşil mutabakat eylem planı” yayınlanmıştır (Yeşil Mütabakat Eylem Planı Genelgesi, 2021). İzlenen bu politikaların temelinde ‘ekonomik kalkınma, yaşanabilir şehirler ve sürdürülebilir çevre’ düşünceleri yer almaktadır. Bu eylem planı kapsamında tarımda kimyasal gübre girdilerinin azaltılması ve atık maddelerin geri kazanılması da yer almaktadır (Yeşil Mütabakat Eylem Planı, 2021). Dünyanın en büyük sorunlarından biri olan çevre kirliliğini azaltmak ve ekosistemin dengesini korumak gerekmektedir.

Bitkisel üretimde kimyasal gübrelerin kullanımı verimi arttırmaktadır, ancak bunun yanında topraklarda bazı fiziksel, kimyasal ve biyolojik sorunları da beraberinde getirebilmektedir. Meydana gelen çevre sorunları insanları, sürdürülebilir toprak verimliliğini göz önünde bulundurarak organik gübrelere yöneltmiştir. Ayrıca kimyasal gübrelerin organik materyallerle birlikte kullanıldığında, kullanılan gübrelerin etkinliğinin arttığı bilinmektedir. Organik gübreler, bitkiler için önemli bir besin kaynağıdır ve bunun yanı sıra çevreyi kirliletmeden doğal dengeyi korumakta, bitkisel üretimde verim ve kaliteyi yükseltmektedir. Sürdürülebilir tarımsal verimliliği arttırmak, toprak ekosistemini korumak için toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin doğru olarak belirlenmesi ve belirlenen özellikler dikkate alınarak kültürel önlemler içerisinde önemli bir yer tutan gübrelemenin doğru yapılması gerekmektedir (Bellitürk, 2011).

Besin elementleri arasında azottan sonra bitkisel üretimde en fazla etkisinin olduğu bilinen element fosfordur. Hammadde kaynakları sınırlı olan fosforla gübreleme yönetiminin de, sürdürülebilir bitkisel üretim çalışmaları içerisinde özel bir önemi vardır. Fosfor, özellikle enerji transferi (ATP/ADP), nükleik asit sentezi ve kök gelişimi gibi yaşamsal fizyolojik süreçlerde vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Fosfor, yer kürenin üst kabuğunda ortalama olarak % 0.1 (Brinck, 1978), topraklarda ise % 0.06 (Lindsay, 1979)

düzeyinde bulunmaktadır. Ancak toprakta fosfor, genellikle yüksek düzeyde fikse olma eğilimindedir ve bu nedenle bitkiler tarafından alımı sınırlıdır. Dünya genelinde tarım topraklarının büyük bir kısmının (%70'in üzerinde), ya düşük fosfor içeriği ya da yüksek fosfor adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle bitkilerin yararlanabileceği fosfor düzeyi bakımından yetersiz olduğu görülmektedir (Syers ve ark., 2008). Yapılan araştırmalara göre fosforlu gübrelerle topraklara fosfor uygulandığında toprağın pH, kireç miktarı, organik madde miktarı, çözünür Ca, Mg, Al, Mn gibi 2 ve 3 değerlikli katyonların miktarı, kil miktarı ve tipi, toprağın su miktarı, sıcaklık ve gübrenin uygulama şekline bağlı olarak büyük kısmının (%70-90) fiksasyonu nedeniyle bitkiler tarafından alınması güçleşmektedir (Bertrand ve ark., 2006). Dolayısı ile, topraklara yeterli düzeyde verilse bile, fosforun topraklarda çok değişik şekillerde reaksiyona girerek büyük bir kısmının demir ve alüminyum oksitlerce ve kalsiyum fosfatlarca bitkilerin yararlanamayacağı formlara dönüşerek tutulduğu bilinmektedir (Lu ve Cooner, 1999; McGechan ve Lewis 2002; Dodor ve ark., 2003; Gallet ve ark., 2003; Alam ve Ladha, 2004). Bu durum, özellikle sürdürülebilir tarımsal üretim sistemleri açısından fosfor yönetimini stratejik hâle getirmiştir.

Fosforun toprakta hareketliliğinin zayıf olduğu bilinmektedir (Clarkson, 1981). Nitekim birçok araştırmada, yüzeye verilen fosforun yetiştirilen bitki tarafından alınma etkinliğinin %8 düzeyinde kaldığı belirtilmiştir ve bazı çalışmalarda ise fosfor, banda verildiğinde bitki tarafından alınma etkinliğinin %16 düzeyine çıktığı belirlenmiştir (Sander ve ark., 1990; Sander ve ark., 1991). Fakat diğer taraftan dünyadaki fosfat rezervinin büyük bir kısmının tarımda kullanılan fosforlu gübrelerin üretimi için kullanıldığı, kullanılan miktarın her yıl artmakta olduğu, buna karşın ham fosfat rezervlerinin azalması ve ömrünün çok az olması sebebiyle tarımda fosfor kullanımında daha dikkatli olarak ve mevcut fosforun alım etkinliğinin artırılarak mevcut kaynakların kullanım ömrünün uzatılmasının önemi üzerinde durulmaktadır (Lin ve Huybers, 2012). Tarımda fosfor açığını kapatmak amacıyla kullanılan başlıca kaynaklar arasında kimyasal fosforlu gübreler (örneğin, TSP) ve doğal fosfat mineralleri (örneğin, ham kaya fosfat) yer almaktadır. TSP gibi suda çözünebilen ticari gübreler, kısa vadede yüksek çözünürlükleri sayesinde oldukça etkili olsa da, toprak pH'sına bağlı olarak hızla sabitlenerek çözünürlüğünü kaybetme riskine sahiptir (Hinsinger, 2001). Buna karşın, öğütülmüş fosfat kayası gibi doğal kaynaklar, özellikle asidik topraklarda yavaş



organik materyaller; hem organik madde içeriğini artırarak mikrobiyal faaliyeti aktif hale getirmekte, hem de besin elementlerinin yarayışlılığını arttırarak fosforun adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerini etkilemektedir (Lehmann ve ark., 2011; Zhu ve ark., 2020). Bu materyallerin özellikle fosfor içeren yüzeylerle etkileşimi sonucu, fosforun toprakta daha kararlı formda kalması ya da bitkiye yarayışlılığının artması mümkündür. Ayrıca, organik materyallerin humik ve fulvik asit içerikleri, toprak çözeltisindeki mikro besin elementlerinin (Fe, Zn, Cu, Mn) hareketliliğini de arttırarak bitki gelişimi üzerinde dolaylı etkiler yaratabilmektedir (Antil ve Raj, 2012). Yapılan birçok çalışma, toprağa karıştırılan organik materyallerin toprak fosforunu ve toprağa uygulanan fosforu bitkilere daha fazla yarayışlı hale dönüştürdüğünü göstermektedir. Bununla birlikte hangi organik materyalin daha faydalı olduğu konusunda farklı sonuçlara rastlamak mümkündür (Verma ve ark. 2005; Yaman ve Olhan, 2011; Demirtaş ve ark. 2012; Yu ve ark. 2013; Korkmaz ve ark. 2020; Tamer ve ark. 2021).

Toprağa karıştırılan organik materyallerin fosforu bitkilere daha fazla yarayışlı hale dönüştürmesinin sebeplerinin de;

- a) Toprakta humusun bulunması durumunda bitkiler tarafından kolaylıkla yararlanılabilen fosfohumik bileşikler olduğunu,
- b) Humat iyonlarının fosfat iyonları ile yer değiştirmesi sonucu bağımsız şekle geçen fosfat iyonlarından bitkilerin daha fazla yararlandığı,
- c) Humusun, demir ve alüminyum oksitlerin etrafını kaplamak suretiyle toprakların fiksasyon kapasitelerini büyük ölçüde azalttığı görüşleri ile açıklanmıştır.

Yine organik materyallerin parçalanması sonucu açığa çıkan sitrat, oksalat, tartarat, malat ve malonat gibi organik anyonların demir ve alüminyum ile durağan bileşikler oluşturarak fosforun açığa çıkmasına yol açtığını, fakat mekanizmanın ayrıntısının henüz tam olarak açıklığa kavuşturulamadığı bildirilmiştir (Kacar ve Katkat, 2007 b).

Fosforlu kimyasal gübrelerden olan TSP ve ham kaya fosfat gübrelerinin tarımda kullanılmalarıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Organik materyallerle birlikte kullanılmalarıyla ilgili yapılan çalışmalarda mevcuttur. Bu çalışmalardan bir tanesi olan ve ham kaya fosfatı ile farklı organik materyallerin birlikte uygulamalarının mısır bitkisinin gelişimi, P içeriği ve fizyolojik etkinliği ile bazı bitki besin maddesi içerikleri üzerine etkisini araştırmak amacıyla yapılan bir çalışmada, toprağa %3 oranında olacak şekilde fındık zuruf kompostu, çay atığı kompostu, çöp kompostu, sığır gübresi, koyun gübresi,

at gübresi, tavuk gübresi ve ticari organik gübre uygulamaları ile 300 mg kg<sup>-1</sup> fosfor olacak şekilde ham fosfat uygulanmış ve 15 gün süreyle inkübasyona bırakılmıştır. Araştırma sonucuna göre, bitkide en yüksek kuru ağırlık sığır, tavuk ve at gübresi uygulamalarından elde edilmiştir. Bitkinin P içeriğinin, uygulanan organik materyallere göre farklılık gsterdiğı fakat en yüksek P içeriğinin tavuk, p kompostu, fındık zuruf kompostu uygulamalarıyla elde edildiğı belirlenmiştir. Bitkinin P alımının, agronomik ve konsantrasyona göre fizyolojik etkinliğinin de yine aynı şekilde uygulanan organik materyallere göre farklılık gsterdiğı fakat en yüksek sonuçların tavuk, sığır ve at gübresi uygulamalarında görüldüğü belirlenmiştir. Ayrıca ham kaya fosfat uygulamalarının mısır bitkisinin kuru ağırlığını, fosfor içeriğini, fosfor alımını, konsantrasyona göre fizyolojik etkinliğini ve demir içeriğini önemli düzeyde arttırdığı belirlenmiştir (Yurtseven, 2019). İçerisinde ahır gübresi ve vermikompostun da bulunduğ farklı organik materyallerle, farklı iki nem içeriğı koşullarında yapılan bir çalışmada, her iki nem koşulunda da organik materyallerin topraktaki mevcut fosforun salınımını arttırdığı ve bu durumun da fosforun etkin kullanımına katkı sağlamadığı belirlenmiştir (Islam ve ark., 2021). Yine yapılan bir başka çalışmada farklı dozlarda ahır gübresi uygulanarak domates yetiştirilmiş ve çalışma sonunda, ahır gübresinin verimi arttırdığı ve fosfor değerlerini 1.49-2.33 mg/g arasında değiştirdiğini göstermiştir (nl ve Padem, 2010). Farklı dozlarda ahır gübresinin ve farklı dozlarda fosforlu gübrenin kombine şekilde kullanıldığı ve 3 yıl boyunca sürdürülen bir başka çalışma, ahır gübresi ve fosforlu gübrenin birlikte kullanıldığında, fosforun alım etkinliğı artmakta ve kuru madde veriminde ciddi artışlara neden olmaktadır (Yıldırım, 2010).

Son yıllarda organik materyaller arasında gösterilen biochar ile ilgili oldukça fazla çalışma yapılmakta ve biocharın topraktaki ve bitki yetiştiriciliğindeki etkileri araştırılmaktadır. Pek çok çalışma göstermiştir ki biochar bitkisel üretimde verimi artırmakta ve toprağa organik madde kazandırarak topraktaki bazı kimyasal ve biyolojik olaylara katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle de diğer organik materyallere alternatif olarak öne çıkmaktadır (Atkinson ve Fitzgerald, 2010; Verheijen ve ark. 2010; Palansooriya ve ark. 2019). Bazı alışmalar biocharın fosforun yavaş salınımına etki ederek, fiksasyonu kısmen nlediğı ve fosfor alım etkinliğini arttırdığı yndedir. Fosforun alım etkinliğinde ve mahsul veriminde, biocharın yapımında kullanılan materyalin farklılık gsterdiğı fakat materyale bakılmaksızın kullanılan biocharların özellikle fosfor salınımı

üzerine olumlu etkileri olduğu bilinmektedir (Das ve ark. 2015; Sharma ve ark. 2016; Das ve Ghosh, 2021). Biocharın yapımında kullanılan farklı atık maddelerin yapısı ve içeriğine göre biocharın içeriğinde değişmektedir. Mutfak atığından elde edilen biocharın, ham kaya fosfat ve TSP gübresiyle birlikte kullanılmasıyla fosfor alım etkinliğinde ve bitki veriminde artışa neden olmuştur (Naher ve ark., 2021). Biocharın farklı N, P, K içerikli gübrelerle birlikte kullanımında, besin elementlerinin salınımını etkilediği, bitkinin besin içeriği, verim ve kalitesini artırdığı, mikrobiyal aktivite ve toprağın organik madde kazanımına katkı sağladığı görülmüştür (Husk ve Major, 2008; Guereña ve ark. 2013; Şahin ve ark. 2016; Lima ve ark. 2018; Sun ve ark. 2018; Oladele ve ark. 2019; Lee ve ark. 2020; Lee ve ark, 2021).

Toprağın sürdürülebilir verimliliği için önemli, organik maddece zengin bir diğer organik materyal olan vermikompost alternatif bir gübre kaynağı haline gelmiştir. Vermikompost, tarımsal üretimde son yıllarda oldukça yaygınlaşan bir materyal olup birçok organik materyalin solucanlar tarafından sindirilmesiyle elde edilen çevre dostu olan önemli bir organik gübredir (Şimşek ve Erşahin 2007). Vermikompostun farklı dozlarda ve farklı bitkilerde kullanıldığı pek çok çalışma mevcuttur. Vermikompost yetiştirilen bitkilerin vejetatif gelişimini (bitki boyu, yaprak sayısı, eni ve boyu, kök ağırlığı), verimini ve besin elementi alımlarını olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca vermikompostun topraktaki fosforun yararlanılabilirliğini artırdığından da söz edilmektedir (Hınıslı, 2014; Açıkbaş, 2016; Büyükfiliz, 2016; Eryüksel, 2016; Müftüoğlu ve ark. 2016; Vurgun ve Müftüoğlu, 2019). Bahsedilen bilgilerin ışığında, bu tez çalışmasının fosforlu kimyasal gübrelerin organik materyallerle kullanımının fosfor etkinliğini nasıl ve ne derecede artırdığını, fosfor adsorbsiyonuna ve mikro besin maddeleri yararlanılabilirliği üzerine olan etkileri ortaya konarak zirai alanda kullanılan gübre çalışmalarına bir alternatif sunması beklenmektedir. Dünyada ve ülkemizde fosfor fiksasyonu üzerinde sürekli çalışılan ve daimi olarak sorun teşkil eden bir konudur. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan organik materyallerin fosfor fiksasyonunu azaltıcı etkisine bakılmış ve hangi organik materyalin daha etkili olduğu farklı pH koşullarında belirlenmiştir. Bu sayede fosforun etkin kullanımına ne denli katkı sağladığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma farklı fosforlu gübre, organik materyaller ve farklı pH'ya sahip topraklarda yapıyor olması açısından diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Çalışmada fosforun adsorbsiyonuyla birlikte mikro besin maddelerinin yararlanılabilirliği ve biyolojik özelliklerdeki değişimlerinde incelenmesi

Çalışmanın içerik ve kapsamını zenginleştirmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların sürdürülebilir toprak yönetimi ve tarım açısından önemi büyük olacaktır.

Bu çalışmada amaç, fosforlu kimyasal gübrelerin farklı organik materyallerle (ahır gübresi, vermikompost ve biochar) farklı pH'ya sahip (asidik, nötr ve bazik) 3 farklı toprağa uygulanmasının topraktaki fosforun değişimi ve adsorbsiyonu üzerine etkilerini araştırmak, buna ek olarak yapılan uygulamaların topraktaki mikro besin elementlerine, bazı enzimlerin aktivitesine ve mikrobiyal biyokütleye etkilerini araştırmaktır. Ayrıca, bu uygulamaların mısır bitkisinin gelişimi üzerindeki etkisi yeşil aksam analizleri ile ortaya konarak, farklı pH koşullarında optimum fosfor yönetimi stratejileri geliştirilmesi hedeflenmektedir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Fosfor (P), bitki beslenmesinde azot ve potasyumdan sonra en çok gereken makro besin elementlerinden biridir. Ancak, topraklardaki fosforun çoğu, bitkilerin alabileceği formda değildir ve bu durum fosfor verimliliğini sınırlandırmaktadır (Shen ve ark., 2011). Bu nedenle, fosfor gübrelerinin etkinliğini artırmak için başta pH olmak üzere toprak özellikleri dikkate alınarak uygun formda gübre kullanılması önemlidir.

### 2.1. Fosforlu Gübrelerin (TSP ve Kaya Fosfat) Etkinliği

Topraklardaki yarayışlı fosfor eksikliğinin giderilmesinde başlıca fosforlu gübreler olan triple süperfosfat (TSP) ve öğütülmüş kaya fosfatı, çözünürlükleri ve bitkiye yarayışlılıkları açısından farklılık gösterir. TSP suda kolay çözünebilen, kısa vadede yüksek verim sağlayan bir kimyasal gübre olmakla birlikte ham kaya fosfatı, çözünürlüğü düşük olması sebebiyle özellikle asidik koşullarda yavaş salınım sağlayarak uzun vadeli fosfor desteği sunabilmektedir (Chien ve ark., 2011; Nziguheba ve ark., 2016). Fakat bu kimyasal fosforlu gübrelerin topraktaki etkinliği, yalnızca kimyasal bileşimlerine değil, aynı zamanda uygulandıkları toprağın mineralojisine ve mikrobiyal aktivitesine, özellikle de toprak pH'sına bağlıdır (Roy ve ark., 2016). TSP ve ham kaya fosfatı gibi fosforlu gübrelerin, mısır bitkisi yetiştiriciliğinde farklı toprak koşullarında ve organik materyallerle kombinasyon halinde gösterdikleri performansın değerlendirilmesi, hem verimlilik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır.

TSP (Triple Superphosphate), suda çözünür ve bitkiler tarafından kolayca alınabilen fosfat içerir. Triple Süper Fosfat (TSP), yüksek çözünürlük özelliği nedeniyle kısa vadede bitki fosfor ihtiyacını hızlı şekilde karşılar. Ancak bu çözünürlük, fosforun toprak partiküllerine hızla bağlanmasına da neden olabilir (Sharpley, 1995). Bu nedenle, nötr ve alkali topraklarda daha etkili olduğu görülmektedir. Ancak, asidik topraklarda TSP'nin fosforu Fe ve Al bileşikleriyle bağlanarak sabitlendiği durumlar görülmüştür (Hinsinger, 2001). Tarımsal üretimde TSP gibi yüksek çözünürlüklü fosforlu gübrelerin, yanlış uygulandığında yüzey ve yer altı sularında ötrofikasyon riskini artırabilir (Withers ve ark., 2014). Ancak, organik materyallerle birlikte kullanımı bu riski azaltabilir. Ham kaya fosfat ise çevreye daha az risk oluşturur, yavaş çözünür ve çevresel kayıpları sınırlıdır.

Nziguheba ve arkadaşları (1998), organik ve inorganik fosfor kaynaklarının toprak fosfor fraksiyonları ve mikrobiyal biyokütle üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, Kenya'nın Batı Yüksek Platosu'nda bir tarla denemesi yürütmüşlerdir. Triple süperfosfat (TSP), Afrika'da organik fosfor kaynağı olarak kullanılan '*Tithonia diversifolia*' ve ikisinin kombinasyonları kullanmışlardır. TSP uygulamalarının toprakta çözünür ve mikrobiyal biyokütle fosforunu artırırken, organik uygulamalara göre daha kısa süreli etkilere yol açtığını, kombine uygulamaların ise mikrobiyal biyokütle fosforunu en üst düzeye çıkarttığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışma, TSP'nin mikrobiyal P havuzunu genişletici potansiyel taşıdığını, ancak organik katkılarla sinerji oluşturduğunda daha sürdürülebilir etki sağladığını göstermektedir.

Cheng ve arkadaşları (2021), tropikal bir Ferralsol toprakta TSP'nin fosfor çözünürlüğü ve dinamikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, TSP uygulamasının toprakta çözünür fosfor konsantrasyonlarını artırdığını, ancak bu artışın zamanla azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, TSP uygulamasının toprakta fosforun farklı fraksiyonlara dönüşümünü etkilediğini ve bu dönüşümlerin fosforun bitki tarafından kullanılabilirliğini sınırlayabileceği, ayrıca TSP'nin toprakta fosfor adsorpsiyon süreçlerini etkileyerek fosforun bitki tarafından alımını sınırlayabileceğini belirlemişlerdir.

Guera ve Fonseca (2022), Brezilya'nın Ponta Grossa bölgesinde yürüttükleri 5 yıllık bir tarla çalışmasında, entegre tarım-hayvancılık sisteminde (ICLS) farklı fosfor kaynaklarının (TSP, kaya fosfatı, magnezyum termofosfat) ve dozlarının (60, 120, 180 kg  $P_2O_5$ /ha) toprak fosfor fraksiyonları ve kimyasal özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, TSP uygulamasının özellikle üst toprak katmanlarında (0–15 cm) labil fosfor (LP) fraksiyonlarını artırdığı, bu artışın toprak organik karbonu (TOC) ve kalsiyum (Ca) konsantrasyonlarıyla güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, yüksek Ca ve TOC seviyelerinin, fosforun daha labil formlarda tutulmasını sağlayarak bitki tarafından alımını kolaylaştırdığını gözlemlemişlerdir. Bu bulgular, TSP'nin entegre sistemlerde fosfor yönetimi açısından etkili bir gübre olduğunu göstermektedir.

Velasco-Sánchez ve arkadaşları (2023), toprak mikroorganizmalarının, düşük çözünürlüklü fosfor (P) kaynaklarından bitkiler için erişilebilir fosfor (Olsen P) salınımindaki rolünü değerlendirmek amacıyla, Fransa'nın Normandiya bölgesinden

alınan P bakımından fakir bir tarım toprağında 63 gün süren bir inkübasyon deneyi gerçekleştirmişlerdir. Deneyde, hidroksiapatit (P-Ca), demir fosfat (P-Fe), fitik asit (P-Org) ve P-Ca ile P-Org karışımı (P-Mix) gibi düşük çözünürlüklü P formları toprağa uygulamışlardır. Mikrobiyal aktiviteyi teşvik etmek amacıyla, başlangıçta selüloz ve potasyum nitrat ( $KNO_3$ ) eklemişlerdir. Pozitif kontrol olarak triple süperfosfat (TSP) ve negatif kontroller (P uygulanmayan) dahil edilmiştir. Sonuçlarda, TSP uygulamasının başlangıçta en yüksek Olsen P seviyelerine sahip olduğunu, ancak zamanla bu seviyelerin azaldığını tespit etmişlerdir. Buna karşılık, özellikle fitik asit (P-Org) uygulanan topraklarda Olsen P seviyelerinde anlamlı artışlar gözlemlendiğini ve bu artışların, mikrobiyal biyokütle C:P oranı ve fungal biyokütle (18S rRNA gen kopya sayısı) ile pozitif korelasyon gösterdiğini betlirtmişlerdir. Araştırmacılar bu bulguların, toprak mikroorganizmalarının, özellikle de mantarların, düşük çözünürlüklü organik P formlarını bitkiler için erişilebilir hale getirmede önemli bir rol oynadığını ortaya koyduğunu, ayrıca TSP'ye kıyasla mikrobiyal katkıların, zayıf fosfor kaynaklarını kullanılabilir hâle getirmede büyük potansiyele sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Yang ve arkadaşları (2024), İrlanda'daki 747 mineral üst toprak örneği üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, TSP uygulamalarının toprakların fosfor adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Langmuir izoterm parametreleri kullanılarak yapılan analizlerde, toprakların maksimum fosfor adsorpsiyon kapasitesi ( $S_{max}$ ) ve bağlanma enerjisi ( $k$ ) değerlerini belirlemişlerdir. Çalışmada, toprakların ekstrakte edilebilir alüminyum ( $M3-Al$ ) içeriği ile  $S_{max}$  arasında güçlü bir ilişki olduğunu ve bu ilişkinin toprakların fosfor adsorpsiyon davranışını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuşlardır. Bu bulguların, TSP uygulamalarının toprakların fosfor adsorpsiyon özelliklerini değiştirebileceğini ve bu değişikliklerin gübre yönetim stratejilerinde dikkate alınması gerektiğini gösterdiğini bildirmişlerdir.

Palihakkara ve arkadaşları (2025), tropikal pirinç tarlalarında yürüttükleri çalışmada, TSP'nin toprak pH'ı ve fosfor salınımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. TSP uygulamasının, özellikle alkali topraklarda, toprak asitliğini artırarak fosforun bitkiler tarafından daha kolay alınmasını sağladığı belirlemişlerdir. TSP'nin toprak pH'ını düşürerek fosforun bitkiler tarafından daha kolay alınmasını sağlayabileceğini gösterdiğini bildirmişlerdir.

Demirbaş (2021), Türkiye'nin Sivas ilinde yürüttüğü tarla koşullarındaki çalışmasında, farklı dozlarda uygulanan triple süperfosfat (TSP) formundaki fosforun, şeker pancarı (*Beta vulgaris* L.) bitkisinin verimi ve besin elementleri alımı üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamıştır. Araştırmada 0 kg/da, 15 kg/da ve 30 kg/da olmak üzere üç farklı fosfor dozu kullanılmış ve her uygulama, 15 kg N/da sabit azot gübrelemesi ile desteklenmiştir. Denemeler tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, artan fosfor dozlarıyla birlikte şeker pancarı veriminde anlamlı artışlar görülmüş; en yüksek verim 30 kg P/da dozuyla 8151 kg/da olarak kaydedilmiştir. Aynı uygulamada, bitkinin azot (%4.77), fosfor (%0.74) ve potasyum (%2.39) konsantrasyonları da en yüksek düzeyde bulunmuştur. Bu durum, fosfor uygulamasının makro besin elementlerinin alımını pozitif yönde etkilediğini ortaya koymuştur. Buna karşın, artan TSP dozları kalsiyum (%1.33 → %1.01) ve magnezyum (%1.47 → %1.09) konsantrasyonlarında düşüşe neden olmuş; bu durumun besin elementleri arasındaki iyonik etkileşimlerden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Mikro elementler açısından değerlendirildiğinde ise sadece demir (Fe) konsantrasyonunda artış gözlenmiş (202 mg/kg → 282.6 mg/kg), çinko (Zn), mangan (Mn) ve bakır (Cu) konsantrasyonlarında ise anlamlı azalmalar tespit edilmiştir (örneğin Zn: 41.68 → 24.01 mg/kg). Bu bulgular, özellikle fosfor-çinko ve fosfor-mangan etkileşimlerine bağlı olarak bu mikro elementlerin bitkideki metabolik işlevlerinin baskılanabileceğine işaret etmektedir. Korelasyon analizine göre, verim ile azot ve demir alımı arasında pozitif, çinko, mangan ve bakır alımıyla ise negatif yönlü anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Bu bulgular, fosfor gübrelemesinin yalnızca verim artışı açısından değil, aynı zamanda diğer besin elementleriyle olan etkileşimleri yönünden de dikkatli değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Amyanpoori ve arkadaşları (2015), İran'ın Behbahan bölgesinde yürüttükleri bir çalışmada, vermikompost ve triple süperfosfat (TSP) gübre uygulamalarının mısır (*Zea mays* L.) verimi ve verim unsurları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneme, farklı dozlarda vermikompost (5000 ve 10000 kg/ha) ile üç düzeyde TSP (50%, 75% ve 100%) kombinasyonlarıyla, faktöriyel düzende ve dört tekrarlamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma bulgularına göre, vermikompost uygulamaları bitki boyu, klorofil içeriği, hasat indeksi, koçan sayısı, sıra başına dane sayısı, 1000 dane ağırlığı ve genel verim üzerinde anlamlı artışlar sağladığı saptanmıştır. Özellikle 10 t/ha vermikompost + %50 TSP

kombinasyonunun, hem bitki boyu (214.7 cm) hem de koçan sayısı (1.96 koan/bitki) bakımından en yüksek değerlere ulaştığını, ayrıca, 1000 dane ağırlığının en fazla 10 t/ha vermikompost + %75 TSP uygulamasında (279.6 g) olduğunu tespit etmişlerdir. TSP, tek başına uygulandığında düşük düzeyde artışlar sağladığını, vermikompost ile birlikte kullanıldığında ise verim bileşenlerinde pozitif yönde etkileşimler gözlendiğini belirmişlerdir. Çalışmada ayrıca vermikompost uygulamasının toprakta mikrobiyal aktiviteyi artırarak sitokinin gibi bitki büyüme düzenleyicilerinin üretimini teşvik ettiği ve bu durumun mısırın genel gelişimini desteklediğini bildirmişlerdir. Araştırmacılar elde ettikleri bulgulara göre, organik materyallerle desteklenen fosforlu gübrelemenin mısır gibi fosfor duyarlılığı yüksek bitkilerde verim ve kaliteyi artırabileceğini göstermesi açısından önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Sikdar ve arkadaşları (2020), Çin'in Fengxian bölgesinde yer alan Pb-Zn madeni atıklarında yürüttükleri sera koşullarındaki pot denemesiyle, ağır metal (Pb, Zn, Cd, Cu) içeriği yüksek maden artıklarının fitostabilizasyonu amacıyla *Amorpha fruticosa* bitkisini kullanarak, organik materyallerle birlikte uygulanan triple süper fosfat (TSP) gübresinin etkinliğini araştırmışlardır. Çalışmada, inorganik fosfor kaynağı olarak TSP (Pb/P molar oranı 1:4), organik katkı olarak ise sığır gübresi kompostu (CMC), mantar kompostu (SMC), kanalizasyon amuru (SS), tarım toprağı (AFS) ve odun kömürü (WB) farklı oranlarda uygulamışlardır. Toplam 180 gün süren denemelerde, organik katkı + TSP kombinasyonlarının, özellikle CMC ve SMC uygulamalarında, toprakta DTPA ile ekstrakte edilebilen ağır metallerin (zellikle Pb ve Cd) biyoyararlılığını anlamlı şekilde düşürdüğünü ve *A. fruticosa*'nın biyokütle üretimini önemli ölçüde arttırdığını saptamışlardır. CMC ve SMC uygulamaları ile kök ve gövde kuru ağırlığı en yüksek seviyelere ulaşırken (rneğin CMCT3 ile toplam biyokütle 32.9 g/pot), WB ve SS uygulamalarında ise bu parametreler kontrol grubu düzeyinde kaldığını belirlemişlerdir. Özellikle WB'nin yüksek elektriksel iletkenliği ( $EC > 4.5$  dS/m) nedeniyle fitotoksik etki gösterdiği ve bazı uygulamalarda bitki gelişiminin tamamen engellendiğini rapor etmişlerdir. Yaprakta llen klorofil a ve b içerikleri ile çözünür protein düzeyleri CMC ve SMC ile artarken, PAL (phenylalanine ammonialyase) ve PPO (polyphenol oxidase) gibi antioksidatif enzim aktiviteleri azaldığını; CAT (katalaz) aktivitesinin ise arttığını sağtamışlardır. Bu değişimlerin, metal stresine karşı bitki savunma sisteminin aktive olduğunu ve TSP + organik katkı uygulamalarının fitotoksisiteyi azalttığını gösterdiğini

bildirmişlerdir. Bitki dokularındaki metal birikimini incelediklerinde, Pb, Cd, Zn ve Cu en fazla köklerde birikmiş olduğunu; yaprak ve gövdede ise oldukça düşük düzeyde kaldığını belirlemişlerdir. Sonuç olarak, araştırmacılar CMC ve SMC gibi organik katkıların, TSP ile birlikte kullanıldığında hem toprağın fizikokimyasal özelliklerini iyileştirdiğini hem de metalin topraktaki alınabilirliğini düşüdüğünü, bitki gelişimini ve fitostabilizasyon etkinliğini artırdığını ortaya koymuşlardır.

Erden (2023), Siirt ekolojik koşullarında yürüttüğü çalışmada, fosfat çözücü bakteriler, inorganik fosforlu gübre (TSP) ve tavuk gübresinin mercimek (*Lens culinaris* L.) bitkisinin verimi ve verim öğeleri üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamıştır. Araştırmada, *Brevibacillus choshinensis* (TV53D) ve *Kluyvera cryocrescens* (TV113C) türleri ile fosfat çözünürlüğünün artırılmasını hedeflemiş; organik gübre olarak farklı dozlarda tavuk gübresi, inorganik fosfor kaynağı olarak ise TSP kullanmıştır. İki yetiştirme sezonu boyunca yaptığı denemelerde, bitki gelişim süresi, dal ve bakla sayısı, tane verimi, biyolojik verim, protein oranı gibi birçok morfolojik ve fizyolojik özelliği incelemiştir. Çalışma sonucunda, en yüksek tane veriminin P1 (4 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/da) x T1 (200 kg/da tavuk gübresi) x B2 (TV113C) üçlü kombinasyonu ile 279.03 kg/da olarak elde ettiğini belirtmiştir. Ayrıca, fosfor ve tavuk gübresi uygulamalarının gelişim süresini kısalttığı, bitki boyu, bakla ve tane sayısı, biyolojik ve tane verimi gibi parametreleri anlamlı şekilde artırdığını gözlemlemiştir. Araştırmacı elde ettiği bulgulara göre, organik ve biyolojik girdilerin fosfor gübrelemesiyle birlikte kullanıldığında, mercimek üretiminde verim artışı sağlayabileceğini ve sürdürülebilir gübre yönetimi stratejilerine katkı sunabileceğini belirtmiştir.

Margenot ve arkadaşları (2017), Kenya'nın batısındaki asidik ve oldukça ayrıışmış bir Oxisol (Rhodic Kandiudox) toprakta yürüttükleri uzun dönemli bir arazi denemesi ile fosfor (P) gübrelerinin biyolojik döngü üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, 13 yetiştirme sezonu boyunca, organik çözünürlük düzeyleri farklı iki fosforlu gübre – Minjingu fosfat kayası (PR) ve triple süper fosfat (TSP) – 50 kg P ha<sup>-1</sup> sezon<sup>-1</sup> dozunda uygulanmış ve gübre uygulanmamış bir kontrol parseli ile karşılaştırmışlardır. Araştırmada, P kaynağının mikrobiyal biyokütle fosforu (P<sub>mic</sub>), toprak fosfataz aktiviteleri (asit ve alkali fosfomonoesterazlar ile fosfodiesteraz) ve farklı fosfor fraksiyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Minjingu PR uygulaması, üst toprakta (0–15 cm) TSP'ye kıyasla mikrobiyal biyokütle fosfor içeriğini %299 oranında artırdığını

ve asit fosfomonoesteraz aktivitesini %39 oranında yükselttiğini belirtmişlerdir. TSP uygulanan topraklarda fosforun daha yüksek oranda demir ve alüminyumla bağlı (Fe- ve Al-P) formda bulunduğu tespit edilmiştir. Minjingu PR'nin çözünürlüğü daha düşük olmasına rağmen, uygulandığı topraklarda mikrobiyal fosforun toplam fosfora oranı (%3.5) ve labile P'ye oranı ( $P_{mic}/labile\ P = 0.59$ ) TSP'den (sırasıyla %0.8 ve 0.13) oldukça yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, Minjingu PR uygulaması, toprak pH'sini 5.35'e kadar yükselterek asidik ortamlarda sınırlı hale gelen mikrobiyal aktiviteyi uyarıcı bir kireçleme etkisi yarattığını bildirmişlerdir.

Peine ve arkadaşları (2019), TSP ve biyolojik atık kompostunun topraktaki mikrobiyal biyokütle ve fosfor döngüsü üzerindeki etkileri incelemek amacıyla, Almanya'da uzun süreli bir tarla denemesi yürütmüşlerdir. Denemede mısır (*Zea mays* L.) altında triple süperfosfat (TSP) ve biyolojik atık kompostu (BC) ayrı ayrı ve kombine şekilde uygulamışlardır. Çalışma kapsamında mikoriza kolonizasyonu, fosfataz aktivitesi ve mikrobiyal biyokütle fosforunu analiz etmişlerdir. TSP uygulamasının, mikrobiyal biyokütle fosforunu arttırdığını, fakat mikoriza kolonizasyonunun BC'ye kıyasla önemli ölçüde azalttığını belirlemişlerdir. Kombine uygulamalarda (TSP + BC), hem enzim aktivitesinin hem mikrobiyal biyokütlenin daha yüksek bulunduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, TSP'nin tek başına mikrobiyal fosfor dinamiklerini destekleyebileceğini, fakat simbiyotik mikroorganizmalar üzerinde baskılayıcı etkiler oluşturabileceğini bildirmişlerdir.

Shi ve arkadaşları (2020), Kanada'nın doğusunda yer alan Lévis ve Normandin bölgelerinde yürüttükleri çalışmada, kısa dönemli mineral fosfor gübrelemesinin (triple süper fosfat, TSP) otlak topraklarında mikrobiyal biyokütle, enzimatik aktivite ve mikrobiyal topluluk yapısı üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında çayır kelp kuyruğu (*Phleum pratense* L.) otunun yetiştirildiği alanlarda 0, 20 ve 40 kg P ha<sup>-1</sup> düzeylerinde gübre uygulamaları gerçekleştirmiş; toprakları iki yıl boyunca (2013–2014) üç farklı dönemde (Haziran, Ağustos, Ekim) örneklemişlerdir. Araştırmada, fosfor uygulamalarıyla birlikte toprakta çözünür fosforun (Mehlich-3P) ve mikrobiyal biyokütle fosforunun (SMB-P) anlamlı şekilde artarken, mikrobiyal biyokütle karbonu (SMB-C) ve azotun (SMB-N) üzerinde belirgin bir etki gözlenemediğini belirtmişlerdir. Dehidrogenaz enzimi aktivitesinin fosfor uygulaması ile artış gösterdiğini; buna karşın alkali fosfomonoesteraz (Alk-Phase) aktivitesi üzerinde

herhangi bir değişiklik gözlenmediğini bildirmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmayla, kısa dönemli fosfor gübrelemesinin mikrobiyal fosfor döngüsüne katkı sağladığını ancak mikrobiyal topluluk yapısında kalıcı bir değişim yaratmadığını saptamışlardır.

Yapılan bir çalışmada,  $\text{FePO}_4$  esaslı yeni nesil bir nano-gübre (NF), geleneksel triple süperfosfat (TSP) ile karşılaştırmalı olarak, salatalık bitkilerinde fosfor gübreleme potansiyeli açısından değerlendirilmiştir. P yetersizliği olan bir toprakta 28 gün boyunca yürütölen saksı denemesinde, bitki büyüme parametreleri, doku besin konsantrasyonları, toprakta P elverişliliği, C, N, P ve S mineralizasyonu ile ilişkili enzim aktiviteleri ve mikrobiyal topluluk yapısını incelemişlerdir. Çalışma sonunda, NF ve TSP uygulanan bitkiler arasında kuru madde miktarı, yaprak alanı, SPAD indeksi ve kök gelişimi açısından anlamlı farklar görülmediğini; ancak, toprakta mevcut fosfor (Olsen-P) ve bitki dokusundaki P içeriğinin TSP uygulamasında NF'ye göre daha yüksek bulunduğunu saptamışlardır. Araştırmacılar enzim aktiviteleri açısından değerlendirdiklerinde, asit fosfataz,  $\beta$ -glukozidaz ve arilsulfataz aktivitelerinin benzer seviyelerde bulunurken; alkali fosfataz aktivitesinin TSP uygulamasında daha yüksek, proteaz aktivitesinin ise NF uygulamasında belirgin şekilde daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda,  $\text{FePO}_4$  nanoparçacıklarının TSP'ye kıyasla toprakta daha yavaş çözölen ve farklı kimyasal formlarda salınan P'yi sağladığı, ancak morfo-fizyolojik gelişme bakımından benzer etki gösterdiğini belirlemişlerdir (Ciurli ve ark., 2023).

Maru ve arkadaşları (2020), Malezya'nın Sarawak bölgesine ait yüksek asitli tropikal bir toprakta yürüttükleri pot deneyinde, tavuk gübresi kökenli biochar (CLB) ve triple süperfosfat (TSP) uygulamalarının toprak fosfor (P) dinamikleri ile mısır (*Zea mays* L.) verimi üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, 5 ton/ha oranındaki CLB'nin %25, %50 ve %75 düzeyleri ile 60 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ /ha eşdeğerindeki TSP'nin yine %25, %50 ve %75 oranları kombinlenerek 12 farklı muamele oluşturulmuş ve bu kombinasyonların P alımı, toprak asitliliği, verim öğeleri ve agronomik verimlilik üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre, sadece TSP uygulanan T2 muamelesine kıyasla, %25 veya %50 CLB + %75 TSP kombinasyonlarının (T10, T11, T12) hem toprakta toplam ve alınabilir fosfor düzeylerini arttırdığını hem de mısır bitkisinde P alımını, kuru madde üretimini ve agronomik verimliliği anlamlı düzeyde yükselttiğini belirtmişlerdir. Özellikle T10 (25% CLB + 75% TSP) uygulamasının, maksimum agronomik verimlilik değeri (101.99) ve yüksek P geri kazanım oranı (%30)

ile öne çıktığını bildirmişlerdir. Toprak analizlerinde, CLB uygulamalarının toprak pH'ını önemli ölçüde arttırdığını (pH 4.4 → >5.5), değişebilir  $Al^{3+}$  ve  $H^+$  iyonlarını düşürdüğünü, toplam ve alınabilir P düzeylerini yükselttiğini; ayrıca, CLB'nin yüksek pH'lı yapısı ve yüzey özellikleri sayesinde Al ve Fe iyonlarının bağlanarak P fiksasyonu azalttığını ve bunun da bitki tarafından alınabilir P'nin artmasını sağladığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu durumu, CLB'nin kireçleme etkisiyle de açıklamışlardır. Bitki düzeyinde, CLB + TSP uygulamalarının yaprak, gövde ve köklerde N, P, K, Ca, Mg ve Na alımını arttırdığını, ayrıca Fe birikimini azaltarak toksisite riskini düşürdüğünü, bunun yanında, toprakta organik karbon miktarı ve katyon değişim kapasitesinin (CEC) de artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Ancak sadece CLB uygulanan muamelelerde (T3 gibi) mısır veriminde yeterli artış sağlanamadığını, bu durumun CLB'nin tek başına yeterli P sağlayamadığını, kimyasal gübre ile birlikte kullanımının daha etkili olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar, yüksek asitli tropikal toprakların verimliliğini artırmak için TSP'nin %25–50'si kadar CLB ile birlikte kullanılması gerektiğini, bu sayede hem fosfor gübre kullanım etkinliğinin artırılacağına hem de çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğe katkı sağlanabileceğini belirtmişlerdir.

Fosforlu kimyasal gübrelerde bir diğer olan ham kaya fosfatın ise çözünmesi daha güçtür ve bitkisel üretimde doğrudan kullanımı sınırlıdır. Fakat, asidik toprak koşullarında daha fazla çözündüğü ve bitkilere fosfor sağladığı görülmüştür (Chien ve ark., 2011). Ham kaya fosfatlar, özellikle asidik toprak koşullarında daha yavaş ama kalıcı bir fosfor kaynağı sunar. Mikrobiyal aktivite ve organik asit salınımı, bu ham kaya fosfatların çözünürlüğünü artırabilir (Van Straaten, 2002).

Rehman ve Qayyum (2020), Pakistan'ın Multan bölgesinde yürüttükleri tarla denemeleriyle, kanalizasyon çamuru (SS), ahır gübresi (FM) ve kaya fosfatının (RP) birlikte kompostlanması sonucu elde edilen ko-kompostların pirinç-buğday rotasyon sisteminde fosfor gübrelerinin yerine geçebilirliğini ve toprak verimliliğine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada yedi farklı kompost formülasyonu hazırlamış; bu kompostlar tek başlarına ya da değişen oranlarda RP ilavesiyle birleştirilmişlerdir. T5 (SS25%: FM25%: RP50%) uygulamasının, hem pirinç hem de buğday veriminde en yüksek değerleri sağladığını (örneğin pirinçte tane verimi 1.63 t/ha; buğdayda 1.40 t/ha) ; ayrıca, uygulamaların toprakta Olsen P seviyesini önemli ölçüde artırdığını, aynı zamanda hem

pirinç hem buğday bitkisinde fosfor alımı ve çinko konsantrasyonunu artırdığını saptamışlardır. Kompostların Langmuir ve Freundlich adsorpsiyon izotermiyle yapılan değerlendirmelerinde, RP içeren uygulamaların (özellikle T5, T6, T8) toprakta fosforun adsorpsiyon eğilimini düşürdüğünü ve yarayışlılığını artırmıştır. Ayrıca RP ilavesinin topraktaki ağır metal içeriğini (örneğin Zn, Pb, Cd) kontrol etmede olumlu katkılar sağladığını da belirtmişlerdir. Yazarlar, ahır gübresi ve RP ile birlikte SS'nin kompostlanmasının, fosfor kaynaklarının geri kazanımı ve atıkların çevreye zarar vermeden tarım sistemine yeniden kazandırılması açısından etkili bir çözüm sunduğunu ifade etmişlerdir.

Oliveira ve Ferreira (2014), kaya fosfatı ile zenginleştirilmiş organik kompostun (OMC) toprak biyolojik aktivitesi ve enzim fonksiyonları üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla sera koşullarında 28 günlük bir inkübasyon denemesi gerçekleştirmiştir. Kompost, kahve çekirdeği posası (%62), sığır gübresi (%7), kaya fosfatı (%28) ve alçı taşı (%3) içerecek şekilde aerobik koşullarda hazırlanmış ve farklı oranlarda (0, 10, 20, 40, 80 g/kg) toprağa uygulamışlardır. Deneme sonunda, toprak mikrobiyal solunumu (SMR), dehidrojenaz (DHA), flüorescein diasetat hidrolizi (FDA),  $\beta$ -glukozidaz ( $\beta$ -GLU) ve asit/alkali fosfataz (ACP/ALP) aktivitelerinde, uygulanan OMC dozlarına bağlı olarak belirgin artışlar kaydetmişlerdir. SMR, 80 g/kg OMC uygulamasında en yüksek değere ulaşarak kontrol grubuna göre yaklaşık 4.7 kat arttığını, benzer şekilde, enzim aktivitelerinde de en yüksek artışın bu dozda olduğunu belirlemişlerdir. Ancak invertaz (INV) aktivitesinin, 80 g/kg dozda tersine düşüş gösterdiğini; bu durumun yüksek OMC düzeyinde mikrobiyal stres veya substrat baskılanmasından kaynaklandığı düşündüklerini ifade etmişlerdir. OMC uygulamaları sonucunda toprakta elde edilen alınabilir fosfor (Pa) miktarının, kontrol grubuna kıyasla 13 kat arttığını, en yüksek OMC dozu ile 1622 mg P/kg toprak düzeyine ulaşıldığını ve bunun, fosfor açısından zenginleştirilmiş kompostun toprakta fosfor mobilizasyonunu güçlü biçimde artırabildiğini gösterdiğini belirtmişlerdir. Çalışmanın sonunda yazarlar, kaya fosfatı ile zenginleştirilmiş kompostun (OMC) yalnızca bir fosfor kaynağı değil, aynı zamanda toprak biyolojik sağlığını iyileştiren, mikrobiyal solunumu tetikleyen ve enzimatik fonksiyonları güçlendiren bir tarımsal girişim olarak değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Özellikle organik atıkların faydalı bir şekilde geri dönüştürülmesi ve

toprak verimliliğine katkı sağlaması açısından bu tür kompost uygulamalarının yaygınlaştırılması önerilmektedir.

Trabelsi ve arkadaşları (2017), *Phaseolus vulgaris* yetiştirilen cam sera koşullarında yaptıkları bir çalışmada, triple süperfosfat (TSP) ve kaya fosfatı (RP) gübrelerinin rizosferdeki mikrobiyal topluluk yapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 10 haftalık deneme sonunda, TSP uygulamasının *Proteobacteria*'yı artırırken *Actinobacteria* ve *Firmicutes* gruplarını baskıladığı, RP uygulamasının ise mikrobiyal çeşitliliği daha dengeli koruduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, fosfor kaynaklarının mikrobiyal topluluk bileşimi üzerindeki seçici etkisini net bir biçimde ortaya koymaktadır.

Yapılan bir çalışmada; kaya fosfat ve TSP (triple süper fosfat) gübresi beraber kullanılarak topraklarda alınabilir P ile toprakların biyolojik özellikleri (toprak solunumu, mikrobiyal biyomas C, dehidrogenaz, fosfataz aktivitesi) üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Denemede materyal olarak kullanılan toprağın fosforu fikse etme kapasitesi ve topraktaki alınabilir P içeriği dikkate alınarak buğday bitkisi özelinde kaya fosfat ve TSP gübrelerinden farklı dozlarda uygulama yapılarak ve inkübasyon çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda; TSP gübresi uygulamalarının kaya fosfata göre alınabilir P içeriğinin daha fazla olduğunu ve toprakların biyolojik özellikleri incelendiğinde her iki uygulamada da toprak solunumu, mikrobiyal biyomas C, dehidrogenaz, fosfataz aktivitesinde artış olduğunu belirlemiştir (Bayraklı, 2020).

## **2.2. Organik Materyallerin Etkinliği**

Son yıllarda, tarımda sürdürülebilirliğin üzerinde durulmaktadır. Bu bağlamda, kimyasal gübre kullanımını azaltarak çevreye zararlı etkilerini azaltma ve toprak sağlığını iyileştirme amacıyla organik materyallerin kullanımına olan ilgi artmıştır. Biochar, vermikompost ve ahır gübresi gibi organik materyaller, toprak yapısını iyileştirmenin yanı sıra, topraktaki mikrobiyal aktiviteyi ve besin elementi döngülerini destekleyerek fosfor gibi düşük hareketliliğe sahip fiksasyona yatkın elementlerin yarıyışlılığını da artırabilmektedir (Lehmann ve ark., 2011; Agegnehu ve ark., 2016). Humik ve fulvik asit içerikleri sayesinde, mikro elementlerin (Fe, Zn, Mn, Cu) hareketliliğini de arttırabilmektedir (Antil ve Raj, 2012). Ayrıca, organik materyaller toprakta mikrobiyal

aktiviteyi artırarak fosforu organik formdan inorganik forma dönüşmesine katkı sağlar (Richardson ve Simpson, 2011). Bu gibi organik materyallerin özellikle asidik topraklarda pH'yı düzenleyici etkileri fosforun çözünürlüğünü artırmakta ve fosforlu gübrelerle birlikte kullanılarak mısır gibi fosfor talebi yüksek bitkilerde verim artışı sağlanabilmektedir (Glaser ve ark., 2002; Agyarko-Mintah ve ark., 2017). Bu durum, hem TSP hem de kaya fosfatın etkisini destekleyici bir etki yaratmaktadır.

Bu bölümde, organik materyallerin toprak özellikleri ve mısır verimi üzerindeki etkileri ele alınacak; fosfor gübreleriyle birlikte kullanımlarıyla ilgili yapılmış çalışmalara değinilecektir.

Biochar, yüksek yüzey alanı ve baz karakteri sayesinde toprak pH'sını tamponlayarak fosfor adsorpsiyonunu azaltabilir. Ayrıca kireçli topraklarda fosforun çözünürlüğünü artırdığı bildirilmiştir (Lehmann ve Joseph, 2009).

Jin ve arkadaşları (2015), Çin'in güneydoğusundaki subtropikal monsun iklim koşullarında yürüttükleri mikrokozmos inkübasyon çalışmasında, domuz gübresinden elde edilen biocharın toprak özellikleri, fosfor formu dağılımı ve fosfomonoesteraz aktiviteleri üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Siltli tın ve killi tın olmak üzere iki farklı toprak tipi üzerinde 98 gün süresince yürütülen deneylerde, biochar %0, %0.5 ve %1.5 oranlarında uygulanmış; toprak pH'ı, kation değişim kapasitesi (CEC), toplam fosfor (TP), Olsen-P düzeyi ile asidik ve alkali fosfomonoesteraz aktiviteleri gibi parametreler değerlendirilmiştir. Çalışmada, %1.5 biochar uygulamasının hem siltli tın hem de killi tın topraklarda pH'ı sırasıyla 0.5 ve 0.6 birim artırdığı, CEC'yi %53.4'e kadar yükselttiği ve toplam fosfor miktarını %82 civarında artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, P-31 NMR analizleri, biochar uygulamasının özellikle inorganik ortofosfat ve pirofosfat fraksiyonlarını anlamlı düzeyde artırdığını, buna karşın organik monoester fosfor fraksiyonlarını azalttığını ortaya koymuştur. Enzim analizleri sonucunda, biochar uygulaması asidik fosfomonoesteraz aktivitesini düşürürken, alkali fosfomonoesteraz aktivitesini artırmış; bu durum biocharın mikrobiyal kaynaklı enzim üretimini destekleyerek organik fosforun mineralizasyonuna katkı sunduğunu göstermektedir. Biocharın etkilerinin, toprak tipi ve uygulama dozuna bağlı olarak farklılaştığı belirtilmiş; özellikle killi tın toprakta daha güçlü etkiler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, domuz gübresinden elde edilen biocharın toprak pH'ını ve fosforun bitki tarafından alımına

uygun formlarını artırma potansiyeline sahip olduğu, ancak aşırı uygulamanın asidik fosfataz aktivitesini baskılayabileceği vurgulanmıştır. Bu bağlamda, yapılan çalışma kapsamında biocharın özellikle fosfor noksanlığı yaşanan agroekosistemlerde sürdürülebilir bir fosfor yönetim aracı olarak değerlendirilebileceği önerilmektedir.

Gao ve DeLuca, (2018), yürüttükleri çalışmada, organik tarım koşullarında yerel olarak üretilmiş odun biocharının, kumlu tekstürlü tarım topraklarında fosfor dinamiği ve mikrobiyal topluluk yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Özellikle, biochar uygulamasının topraktaki fosfor yarayışlılığına katkısının biyotik (enzimatik aktivite, gen ifadesi) ve abiyotik (yüzey adsorpsiyonu, redoks potansiyeli) mekanizmalar üzerinden değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Üç ay süren uygulama sonrası elde edilen bulgular, biochar ilavesinin aktif inorganik fosfor (sitrarla nebilir P) ve enzimle ekstrakte edilebilir organik fosfor (hareketli P) fraksiyonlarını anlamlı biçimde artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, fosfataz sentezi (phoC) ve organik asit üretimi (gcd, pqqC) ile ilişkili genlerin bolluğunda herhangi bir artış saptanmamıştır. Bu durum, gözlenen fosfor artışıının mikrobiyal bir yanıtla değil, büyük olasılıkla biocharın yüzey özellikleri ve organo-mineral komplekslerin oluşumu yoluyla sağlanan abiyotik süreçlerle ilişkili olduğunu düşündürmektedir. Topraktaki mikrobiyal yapı değişiminde ise özellikle bakteriyel topluluklar lehine bir kayma tespit edilmiştir. Biochar uygulaması sonrasında bakteri/fungus oranı artmış, mikrobiyal biyokütle karbonu da anlamlı şekilde yükselmiştir. Fungal bolluk önemli düzeyde değişmemekle birlikte, Shannon eşitlilik indeksi biochar uygulanan topraklarda daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, yapılan artıklık analizi (RDA) sonuçları; BBP fraksiyonları, toplam karbon, potansiyel mineralize azot (PMN), ve su tutma kapasitesi (WHC) gibi parametrelerin, mikrobiyal biyokütle ve bakteriyel bollukla güçlü pozitif ilişkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Fosforla ilişkili genlerin (phoC, gcd, pqqC) bolluğu ise fosfor fraksiyonlarıyla negatif korelasyon göstermiştir. Bu durum moleküler düzeyde mikrobiyal yanıt ile biyokimyasal süreçlerin her zaman doğrudan ilişkili olmadığını işaret etmektedir. Sonuç olarak bu araştırma, odun biocharının organik tarım sistemlerinde kısa vadede fosfor yarayışlılığını artırabildiğini ve mikrobiyal yapıda bakteriyel ağırlıklı bir dönüşüm sağladığını göstermektedir. Ancak fosforun mikrobiyal mobilizasyonu yönünde doğrudan bir genetik yanıt gözlenmemiştir. Bu durum, biocharın fosfor yönetimi üzerindeki etkilerinin çoğunlukla abiyotik

mekanizmalarla şekillendiğini ortaya koymakta, bu tür katkıların tarımsal sürdürülebilirlik ve toprak sağlığı üzerindeki potansiyelini vurgulamaktadır.

Kamran ve arkadaşları (2018), üç farklı asidik toprak tipinde (Alfisol, Ultisol, Oxisol) tavuk gübresi (CMB), domuz gübresi (PMB) ve turba yosunu (PB) kökenli biocharların kısa vadeli etkilerini araştırarak, bu materyallerin toprak asitliğinin giderilmesi, Olsen-P düzeyi ve fosfataz enzim aktiviteleri üzerindeki potansiyelini değerlendirmiştir. 6 haftalık inkübasyon süresince uygulanan biocharlar %1 ve %2 oranlarında toprağa karıştırılmıştır. Sonuçlar, CMB uygulamasının diğer biochar türlerine kıyasla toprak pH'ını en fazla artıran, değişebilir asitliği en fazla azaltan ve Olsen-P düzeyini anlamlı ölçüde yükselten organik madde olduğunu ortaya koymuştur. %2 CMB uygulaması, Olsen-P düzeyini Alfisol'de 1.78 kat, Ultisol'de 2.41 kat ve Oxisol'de 7.4 kat artırmıştır. CMB ayrıca alkali fosfomonoesteraz aktivitesini yükseltmiş, asidik fosfataz aktivitesini ise baskılamıştır. Bununla birlikte, biochar uygulaması toprakta kurşun ve kadmiyumun biyoyararlanabilirliğini azaltırken; çinko ve bakırın çözünürlüğünde hafif artışlara neden olmuştur. Çalışma, özellikle CMB uygulamasının yüksek pH tamponlama kapasitesi, zengin besin içeriği sayesinde tropikal ve subtropikal bölgelerdeki yüksek oranda ayrılmış asidik toprakların fizikokimyasal ve biyokimyasal iyileştirilmesinde etkili ve maliyet-etkin bir çözüm olabileceğini göstermektedir.

Li ve arkadaşları (2022), Çin'in Qinghai-Tibet Platosu'ndaki bozulmuş alp çayırlarında yürüttükleri kısa süreli arazi denemesiyle, mısır sapından üretilmiş biocharın toprak fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmada, 0%, 0.5%, 1% ve 2% oranlarında uygulanan biochar ile 0–20 cm derinlikteki toprak katmanında toplam organik karbon (TOC), toplam azot (TN) ve alınabilir fosfor (AP) gibi temel verimlilik göstergeleri değerlendirilmiştir. Ayrıca toprak mikrobiyal biyokütle, enzim aktiviteleri (üreaz ve fosfataz), su içeriği, elektriksel iletkenlik ve pH gibi özellikler de detaylı olarak analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, %2 oranındaki biochar uygulaması ile üst toprakta TOC %55, TN %41 ve AP %45 oranında artış göstermiştir. Mikrobiyal biyokütlerde belirgin bir yükseliş gözlemlenirken, özellikle ektomikorizal ve arbusküler mikorizal fungal biyokütlerde anlamlı artışlar kaydedilmiştir. Buna karşılık, saprofitik mantar ve metanotrofik bakteri oranlarında azalma tespit edilmiştir. Araştırma, biochar uygulamasının özellikle yüzey toprak katmanında daha etkili olduğunu ve etkisinin zamanla derin katmanlara doğru ilerlediğini

ortaya koymuştur. Sonuçlar, biocharın toprak verimliliğini artırarak mikrobiyal aktiviteyi olumlu yönde etkilediğini ve özellikle bozulmuş çayır alanlarında restoratif bir girdi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu da sürdürülebilir arazi yönetimi stratejilerine katkı sağlayabilecek nitelikte önemli bir bulgudur.

Liu ve arkadaşları (2023), Çin'in Sarı Irmak Deltası'ndaki tuzlu-alkali çeltik topraklarında yürüttükleri beş yıllık tarla çalışmasında, demir modifiye biocharın (FeBC) mineral gübrelerle birlikte uygulanmasının, toprak agregat yapısı, phoD genini taşıyan bakterilerin çeşitliliği ve organik fosfor (Po) mineralizasyonu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada dört farklı uygulama değerlendirilmiştir: kontrol (gübre uygulanmamış), sadece NPK, NPK + biochar (BC) ve NPK + demirle zenginleştirilmiş biochar (FeBC). Araştırmada, FeBC uygulaması, makroagregat oranını %24.67 ve ortalama ağırlıklı çapı %33.3 oranında artırarak toprak agregat stabilitesini anlamlı şekilde iyileştirmiştir. Aynı zamanda, FeBC ile uygulanan topraklarda, özellikle makroagregat fraksiyonunda, phoD genini taşıyan bakterilerin bolluğu ve çeşitliliğinde artış gözlemlenmiş; bu durum, toprak organik karbonu (SOC) ve çözünür organik karbon (DOC) düzeyleri ile pozitif ilişkili bulunmuştur. FeBC uygulaması, alkali fosfataz (ALP) aktivitesini makroagregatlarda %39.1 oranında artırmış, bu artışın Po mineralizasyonunu teşvik ettiği belirlenmiştir. Ayrıca, Pi fraksiyonlarından AIP ve MAP düzeylerinin de özellikle FeBC uygulamasıyla anlamlı biçimde arttığı saptanmıştır. Redundancy analizleri ve korelasyon testleri, SOC ve Feo düzeylerinin hem phoD bakteriyel toplulukları hem de ALP aktivitesi ile güçlü pozitif ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, Fe-modifiye biocharın mineral gübre ile birlikte uygulanması, tuzlu-alkali topraklarda hem yapısal hem de mikrobiyal düzeyde fosfor döngüsünü iyileştirici önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Liu ve arkadaşları (2017), Çin'in üç farklı tarımsal toprak tipinde (organik kahverengi toprak, asidik kırmızı toprak ve tuzlu toprak) yürüttükleri çalışmada, pirinç kabuğundan elde edilen biocharın fosfor dönüşümü, mikrobiyal aktivite ve fosfat çözücü bakteri toplulukları üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. G koşullarında gerçekleştirdikleri dokuz haftalık inkübasyon denemelerinde, biocharı farklı dozlarda (0, 10, 20 ve 40 ton/ha) topraklara uygulamışlar; toprak pH'ı, gravimetrik su içeriği, mikrobiyal biyokütle karbon ve fosforu, fosfataz enzim aktiviteleri ve bakteri topluluk yapısı gibi parametreleri incelemişlerdir. Araştırmada, özellikle 20 ton/ha biochar

uygulamasının, kırmızı toprakta pH'ı 0.2 birim artırarak asitliği baskıladığı, tuzlu toprakta ise 0.2 birim düşürerek alkaliliği dengelediği rapor edilmiştir. Aynı uygulama, toprakların gravimetrik su içeriğini %1.5 oranına kadar artırmış, Olsen-P düzeyini ve mikrobiyal biyokütle fosforunu anlamlı şekilde yükseltmiştir. Ayrıca, *Thiobacillus*, *Pseudomonas* ve *Flavobacterium* gibi fosfat çözücü bakterilerin sayısı artarken, mikrobiyal topluluk yapılarının zamanla daha nötr pH'lı kahverengi toprağa benzemeye başladığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular biochar uygulamasının toprak mikrobiyal ekolojisini iyileştirerek fosforun biyoyararlanımını artırabildiğini ve bu yolla sürdürülebilir fosfor yönetimi stratejilerine katkı sunabileceğini göstermektedir. Wang ve Zhang (2020), Çin'in Siçuan bölgesine özgü koşullarda yürüttükleri bir çalışmada, kamış-biochar uygulamasının çeltik yetiştirilen topraklarda fosfor kayıplarını azaltmadaki etkisini ve bu sürece mikrobiyal toplulukların katkısını araştırmayı amaçlamışlardır. Denemeler, blok bazlı saksı denemeleri şeklinde kurgulanmış olup, %0'dan %8'e kadar artan oranlarda biochar ile kimyasal gübrenin birlikte uygulanması yoluyla fosfor sızıntısı, toprakta fosfor birikimi ve mikrobiyal fosfataz aktivitesi üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. Araştırmada, *phoD* geni taşıyan fosfat-haritalayıcı bakterilerin bolluğu ve çeşitliliği izlenmiş; bu genin topraktaki fosfataz aktivitesiyle olan ilişkisi detaylı olarak analiz edilmiştir. %1–4 oranlarındaki biochar uygulamaları, özellikle çözünmüş ve partikül fosfor kayıplarını sırasıyla %8.3–10.4 ve %3.0–15.4 oranlarında azaltarak olumlu sonuçlar vermiştir. Bunun yanında, %6–8 oranlarındaki uygulamalar çözünmüş P kayıplarını artırmış; bu da uygulama dozunun fosfor dengesine etkisinde belirleyici olduğunu göstermiştir. En yüksek toprak fosfor birikimi ve kullanılabilir P düzeyi %4'lük uygulama oranında sağlanmıştır. Ayrıca, *phoD* geni taşıyan mikrobiyal toplulukların hem popilasyon hem de çeşitlilik açısından arttığı, ancak bu artışın uygulama oranından bağımsız gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Fosfataz aktivitesi %1–4 aralığında artarken, daha yüksek oranlarda düşüş göstermiştir. Toprak organik karbon içeriği ve mikrobiyal kompozisyon, fosfor hareketini etkileyen temel belirleyiciler olarak öne çıkmıştır. Bu bulgular, kamış-biocharın özellikle düşük dozlarda kullanıldığında, çeltik tarımında fosfor verimliliğini artırabileceğini ve mikrobiyal dinamiklerle entegre sürdürülebilir gübreleme stratejilerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Zhu ve arkadaşları (2017), Kuzeybatı Çin'in Loess Platosu'nda yer alan kuru tarım alanlarında iki yıl boyunca yürüttükleri bu tarla denemesinde, farklı dozlarda uygulanan mısır sapı kökenli biocharın toprak mikrobiyal biyokütlesi (MBC, MBN, MBP) ve enzim aktiviteleri (alkalin fosfataz, üreaz) üzerindeki mevsimsel etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Denemelerde üç farklı biochar dozu (0, 10 ve 30 ton/ha) kullanılmış ve 2013–2014 yıllarına ait beş gelişim evresinde (ekim öncesi, V6, R1, R5, R6) hem 0–10 cm hem de 10–20 cm toprak katmanlarından örneklemeler yapılmıştır. Yürüttükleri bu çalışmada araştırmacılar, biochar uygulamasının özellikle 2014 sezonunda alkalin fosfataz (ALP) aktivitesini istatistiksel olarak anlamlı düzeyde artırdığını ve mikrobiyal fosfor biyokütlesinde (MBP) sezon boyunca belirgin yükselmeler sağladığını gözlemlemişlerdir. Örneğin, 0–10 cm toprak katmanında R6 evresinde, 30 t/ha biochar uygulaması MBP'yi kontrol grubuna göre %81.8 oranında artırmıştır. Aynı zamanda toprak mikrobiyal karbon (MBC) ve azot (MBN) değerleri de mevsimsel olarak dalgalanmış; bazı evrelerde biochar uygulamaları bu parametrelerde anlamlı artışlar sağlamış, ancak V6 döneminde 10–20 cm katmanda düşüşler de gözlenmiştir. Çalışmanın en dikkat çekici bulgularından biri, mikrobiyal biyokütle parametreleri ile toprak su içeriği (SWC) arasında anlamlı pozitif korelasyonların bulunmasıdır. Özellikle MBC ile SWC arasındaki korelasyon katsayısı  $R=0.371$  olarak saptanmıştır. Bu durum, biocharın toprakta su tutma kapasitesini artırarak mikrobiyal faaliyetleri destekleyebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, ureaz aktivitesinde mevsimsel ve derinliğe bağlı dalgalanmalar görülmesine rağmen, biochar uygulamalarının bu enzime olan etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Yazarlar, biochar uygulamasının ALP aktivitesinde artışa neden olmasının toprak pH'sının yükselmesine ve mevsimsel olarak mikrobiyal aktivitenin desteklenmesine bağlı olduğunu vurgulamaktadır. R5 döneminde 10–20 cm toprak katmanında 30 t/ha biochar uygulaması, alkalin fosfataz aktivitesini %25.6 oranında artırmıştır. Ancak benzer dozda uygulama V6 evresinde ALP'yi azaltmıştır. Bu da biochar etkisinin, uygulama dozu, toprak derinliği ve gelişim evresi gibi faktörlere göre değişebileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, biochar uygulamalarının mevsimsel ve derinliğe bağlı olarak değişkenlik gösterse de, mikrobiyal biyokütle ve özellikle fosfataz enzim aktivitesi üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya koymuşlardır. Kurak koşullarda sürdürülebilir verimliliği artırmak amacıyla biocharın,

mikrobiyal süreçleri iyileştiren önemli bir organik katkı materyali olarak değerlendirilebileceğini ifade etmişlerdir.

Foster ve arkadaşları (2018), kontrollü koşullarda yürüttükleri bu çalışmada, çam odunu biocharı ile toprak arasındaki etkileşimin, toprakta karbon ve fosfor döngüsünden sorumlu iki önemli enzim olan  $\beta$ -glukosidaz (BG) ve asit fosfataz (PHOS) aktiviteleri üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda yürüttükleri laboratuvar deneylerinde, her iki enzimin, çam biocharı, tarımsal toprak ve düşük yüzey alanına sahip çim biocharı olmak üzere üç farklı katı yüzey üzerine adsorpsiyonuyla ortaya çıkan aktivite değişimleri ölçülmüştür. Yazarlar, enzimlerin sorpsiyon sonrası kalan aktivitelerini değerlendirdikleri bu çalışmada, özellikle yüksek yüzey alanına sahip olan çam biocharı ile temas eden enzimlerin, toplam aktivitelerinde %95'i aşan oranda düşüş yaşadıklarını gözlemlemişlerdir. Bu durum, biocharın yüksek yüzey alanı ve gözenek yapısının, enzimleri fiziksel olarak absorblayarak ya da elektrostatik etkileşimler yoluyla aktif bölgelerini işlevsiz hale getirmesiyle açıklanmıştır. Buna karşılık, toprak ve düşük yüzey alanlı çim biocharı uygulamalarında enzim aktivitelerinde daha düşük kayıplar gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, en yüksek enzim aktivitesi  $48 \text{ nmol mg}^{-1} 24 \text{ sa}^{-1}$  ile toprak üzerinde, ardından  $44 \text{ nmol mg}^{-1} 24 \text{ sa}^{-1}$  ile çim biocharı üzerinde kaydedilmiştir. Buna karşın, çam biocharı üzerinde her iki enzim için de  $1 \text{ nmol mg}^{-1} 24 \text{ sa}^{-1}$ 'nin altında kalan çok düşük aktivite seviyeleri ölçülmüştür. Bu bulgu, özellikle fosfataz aktivitesinin biochar uygulanan topraklarda neden azaldığını açıklayan temel mekanizmalardan biri olarak "enzim immobilizasyonu"nu işaret etmektedir. Çalışmada ayrıca pH'nın sorpsiyon ve enzim aktivitesi üzerindeki etkileri de test edilmiştir. Her üç pH düzeyinde (6, 7 ve 8) yürütülen deneylerde, pH 6'da sorpsiyonun daha düşük, pH 7 ve 8'de ise daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak genel olarak pH değişimi, enzim aktivitesindeki düşüşe kıyasla daha sınırlı etkili olmuştur. Enzimlerin izoelektrik noktalarının (BG: pH 4, PHOS: pH 5.2) üzerindeki pH koşullarında negatif yüklü hale gelmeleri nedeniyle, biocharın da negatif yüzey yüküne sahip olduğu bu koşullarda, aradaki etkileşimin fiziko-kimyasal olarak da sınırlı hale geldiği düşünülmektedir. Sonuç olarak, biochar uygulamalarının toprakta enzimatik süreçler üzerindeki etkilerinin, yalnızca mikrobiyal aktiviteyi değil, aynı zamanda enzimlerin doğrudan biochar yüzeyine bağlanması yoluyla aktivite kaybını da kapsadığını ortaya koymuşlardır. Bu durum, özellikle yüksek sıcaklıkta üretilmiş odunsu biocharların, fosfataz gibi enzimatik süreçleri

baskılayabileceğini ve bu nedenle biochar uygulamalarında dikkatli yönetim gerektiğini göstermektedir.

Khadem ve Raiesi (2019), yaptıkları bir değerlendirme çalışmasında, arid bölgelerdeki kireçli topraklara uygulanan mısır bazlı biocharın toprak alkali fosfataz (ALP) aktivitesi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada özellikle ALP enzimine ait kinetik ( $V_{max}$ ,  $K_m$ ) ve termodinamik ( $E_a$ ,  $\Delta H_a$ ,  $Q_{10}$ ) parametrelerin biochar uygulamasıyla nasıl değiştiği; bu değişimlerin toprak yapısına ve uygulanan biocharın piroliz sıcaklığına ( $400^{\circ}\text{C}$  ve  $600^{\circ}\text{C}$ ) bağlı olup olmadığı araştırılmıştır. Denemeler, killi ve kumlu tın tekstürüne sahip iki farklı kireçli toprak tipinde, 90 gün süreyle inkübasyon koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, biochar uygulamasının toprakta ALP aktivitesini önemli ölçüde artırdığını ve bu artışın toprak yapısına göre farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle kumlu tın topraklarda ALP aktivitesi 9.7 kat artış göstermiştir. Kinetik analizlerde, killi toprakta  $V_{max}$  ve  $K_m$  değerlerinin yükseldiği, bu durumun enzim miktarındaki artışa karşılık substrat bağlanma affinitesinin azaldığını gösterdiği anlaşılmıştır. Buna karşın, kumlu tın toprakta  $V_{max}$  ve  $K_m$  değerleri azalmış, enzim-substrat bağlanmasının daha etkin hale geldiği görülmüştür. Termodinamik değerlendirmelerde ise, biochar uygulanan topraklarda ALP enzimine ait aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ), entalpisi ( $\Delta H_a$ ) ve sıcaklık duyarlılığı katsayısı ( $Q_{10}$ ) anlamlı şekilde artmıştır. Bu bulgular, biocharın enzim termal stabilitesini ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığını artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek piroliz sıcaklığı ( $600^{\circ}\text{C}$ ) ile elde edilen biocharın bazı durumlarda ALP aktivitesini düşürdüğü ve özellikle killi topraklarda bu etkinin daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Bu durum, enzimlerin biochar yüzeyine adsorbe edilerek konformasyonlarının değişmesiyle açıklanmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma biochar uygulamalarının yalnızca toprak fosfor döngüsünü canlandırmakla kalmadığını, aynı zamanda enzimatik süreçlerin kinetik ve termodinamik özelliklerini de yeniden şekillendirdiğini ortaya koymaktadır. Toprak tipine göre değişkenlik gösteren bu etkilerin, özellikle kurak ve kireçli topraklarda organik P mineralizasyonunu teşvik ederek bitki fosfor alımına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Mailakeba ve Rajashekhar Rao (2020), Papua Yeni Gine'nin Gabensis bölgesine özgü koşullarda yürüttükleri bu çalışmada, nikel (Ni) ile kirletilmiş toprakların biyokimyasal özelliklerini iyileştirme amacıyla Kunai otu (*Imperata cylindrica*) biocharı (biochar)

uygulamasının etkinliğini araştırmışlardır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen çalışmada, farklı seviyelerde Ni kontaminasyonu (0, 56 ve 180 mg Ni kg<sup>-1</sup>) oluşturulmuş ve %0.75 oranında biochar uygulaması yapılmıştır. Denemeler, toprak solunum oranı, dehidrogenaz ve asit fosfataz enzim aktiviteleri gibi temel biyolojik göstergeler üzerinde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, yüksek düzeyde Ni kontaminasyonu (180 mg Ni kg<sup>-1</sup>) toprak solunumunu %37, dehidrogenaz aktivitesini ise %62 oranında baskılamıştır. Buna karşılık, asit fosfataz aktivitesi Ni seviyelerinden etkilenmemiş ve kontaminasyona karşı duyarsız kalmıştır. İlginç şekilde, düşük seviyedeki Ni (56 mg kg<sup>-1</sup>) uygulaması bazı durumlarda solunum hızını artırmış, bu durum mikrobiyal topluluklarda uyum mekanizmalarının devreye girdiğini düşündürmüştür. Ancak genel olarak, biochar uygulaması ne solunum oranını ne de enzimatik aktiviteleri anlamlı düzeyde iyileştirememiştir. Çalışmanın dikkat çekici bir bulgusu da, biochar uygulamasının yüksek Ni seviyelerinde fosfataz aktivitesini daha da düşürdüğünü göstermesidir. Bu sonuç, Kunai otu biocharının kısa vadede mikrobiyal aktivite üzerinde sınırlı bir etki gösterdiğini ve toprak biyokimyasal kalite göstergelerini iyileştirmede yeterli olmadığını ortaya koymaktadır. Araştırmacılar, özellikle dehidrogenaz ve solunum oranı gibi parametrelerin, ağır metal kirliliğinin biyolojik etkilerini izlemek için güvenilir biyobelirteçler olabileceğini önermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, Kunai otu biocharının kısa vadede Ni ile kirlenmiş topraklarda biyolojik kaliteyi artırmada yetersiz kaldığını; ancak bu tür materyallerin karbonizasyon yapılmadan, organik atık formunda değerlendirilmesinin daha etkili olabileceğini göstermektedir.

Sarfraz ve arkadaşları (2020), yaptıkları bu çalışmada, farklı parçacık boyutlarına sahip mantar atığı bazlı biochar uygulamasının, asidik topraklardaki fosfor (P) erişilebilirliği, toprak mikrobiyal yapısı ve fosfataz enzimi aktivitesi üzerindeki kısa vadeli etkileri değerlendirilmiştir. Araştırmada, paddy ve kırmızı toprak olmak üzere iki farklı toprak tipi kullanılmış ve biochar 0.5 mm'den küçük (f), 0.5–1 mm (m) ve 1–2 mm (l) boyutlarında toprağa uygulanarak 15°C ve 25°C sıcaklıklarda 60 gün süreyle inkübasyona bırakılmıştır. Sonuçlar, özellikle ince parçacıklı biocharın, hem toprak pH'sını hem de alınabilir fosfor içeriğini anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymuştur. 25°C'de inkübasyona alınan örneklerde, paddy toprakta 6.46'ya, kırmızı toprakta ise 6.50'ye kadar çıkan pH değerleri, bu biochar uygulamalarının asidik toprakları iyileştirme potansiyelini vurgulamaktadır. Aynı zamanda, 0.5 mm'den küçük biochar parçacıkları,

en yüksek alınabilir P seviyelerini sağlamış ve bu durumun fosfat salınımının daha fazla yüzey alanına sahip küçük parçacıklarla doğrudan ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Buna karşılık, artan P mevcudiyetine bağlı olarak fosfataz enzim aktivitesinde azalma gözlenmiştir. Özellikle en düşük fosfataz aktivitesi, en yüksek alınabilir P değerlerinin ölçüldüğü ince partiküllü biochar uygulamalarında gerçekleşmiştir. Bu bulgu, fosfataz aktivitesinin negatif geri bildirim mekanizmasıyla regüle edildiğini ve fosfor doyumunun enzim sentezini baskılayabileceğini göstermektedir. Mikrobiyal topluluk açısından değerlendirildiğinde, 25°C sıcaklıkta özellikle ince parçacıklı biochar uygulanan örneklerde mikrobiyal çeşitlilik ve zenginlik önemli ölçüde artmıştır. Bu artış, hem pH yükselmesi hem de fosfor mevcudiyetindeki artışla ilişkili bulunmuştur. Alpha ve beta çeşitlilik analizleriyle birlikte PCoA ve RDA analizleri de, mikrobiyal topluluk yapısının parçacık boyutuna ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Özellikle Proteobacteria, Firmicutes, Gemmatimonadetes ve Acidobacteria gibi fosforla ilişkili taksonlar, ince parçacıklı biochar uygulamalarında daha baskın hale gelmiştir. Sonuç olarak, bu araştırma; kısa vadeli uygulamalarda ince parçacıklı biocharın, toprak pH'sını yükselttiğini, fosfor mevcudiyetini artırdığını ve mikrobiyal çeşitliliği teşvik ettiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, uzun vadeli etki mekanizmalarının ve sürdürülebilirlik boyutlarının daha ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir.

Lopes ve arkadaşları (2021), Brezilya'nın tropikal iklim koşullarında yürüttükleri iki yıllık arazi çalışmasında, okaliptüs atıklarından elde edilen biocharın şeker kamışı (*Saccharum officinarum* L.) yetiştirilen topraklardaki mikrobiyal aktivite ve enzim fonksiyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Beş farklı dozda biochar (0, 10, 20, 30 ve 40 Mg ha<sup>-1</sup>) ve kimyasal gübre (NPK) uygulamalarının tekli ve kombine etkileri, toprakta  $\beta$ -glukozidaz, asit fosfataz, arilsülfataz ve üreaz aktiviteleri ile toplam mikrobiyal kalite (FDA testi ile) üzerinden incelenmiştir. Yoğun ayrıışmış, düşük verimli tropikal toprak koşullarında gerçekleştirilen bu çalışmada, biochar uygulamalarının 30 Mg ha<sup>-1</sup> dozuna kadar enzim aktivitelerini ve mikrobiyal biyokütleyi artırdığı; ancak daha yüksek dozlarda bu etkilerin azaldığı rapor edilmiştir. Özellikle mineral gübrelerle birlikte yapılan uygulamalarda,  $\beta$ -glukozidaz, üreaz ve arilsülfataz aktivitelerinde sinerjik artış gözlemlenmiştir. Buna karşın, asit fosfataz aktivitesi NPK varlığında azalırken, sadece biochar uygulandığında daha yüksek seviyelere ulaşmıştır. Çalışmanın sonuçları, biocharın tek başına veya NPK ile birlikte uygulanmasının

enzimatik aktiviteleri ve mikrobiyal kalitenin artırılmasında etkili olduğunu; ancak bu etkinin doz bağımlı olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, biocharın özellikle organik atıkların geri kazanımı ve toprak biyolojik kalitesinin artırılması bağlamında sürdürülebilir tarım stratejilerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Tian ve arkadaşları (2021), Güney Çin'in asidik ve fosforca fakir kırmızı toprak koşullarında yürüttükleri çalışmada, çeltik bazlı biochar uygulamasının, farklı fosfor gübreleme düzeylerinde (0, 30 ve 90 kg P ha<sup>-1</sup>) toprak fosfor fraksiyonları, fosfataz enzim aktiviteleri ve phoD genine sahip mikrobiyal topluluk yapısı üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Yürütülen sera denemesinde, %4 oranında uygulanan biocharın, özellikle düşük fosfor girdisi (<30 kg P ha<sup>-1</sup>) koşullarında, mikrobiyal fosfor mineralizasyonunu uyarıcı etkiler oluşturduğu ortaya konmuştur. Araştırmada, biochar uygulamasının alkalın fosfomonoesteraz (ALP) ve fosfodiesteraz (PD) enzim aktivitelerini anlamlı biçimde artırdığı; buna karşılık, asidik fosfomonoesteraz (AcP) aktivitesi üzerinde kayda değer bir etkisinin bulunmadığı gözlemlenmiştir. Toprakta çözünmeyen organik P miktarının azaldığı, Bray-1 ekstrakte edilebilir P miktarının ise arttığı saptanmıştır. Yapılan yapısal eşitlik modeli (SEM), ALP'nin, organik fosfor dönüşümünde temel belirleyici olduğunu ve bu aktivitenin artışında biochar'ın doğrudan etkili olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmanın moleküler düzeydeki bulgularına göre, biochar uygulaması, phoD gen kopya sayısını doğrudan artırmamış; ancak, bu geni taşıyan bakterilerin topluluk kompozisyonunu değiştirmiştir. Bu değişimin özellikle toprakta artan C:P oranı ile ilişkili olduğu; yüksek karbon ve düşük fosfor koşullarında, ALP üreten Micromonosporaceae familyasına ait türlerin baskın hale geldiği belirlenmiştir. Ko-occurrence (eşzamanlılık) ağı analizleri, düşük P girişi altında biochar uygulanan topraklarda mikrobiyal etkileşimlerin daha organize ve işlevsel gruplar içinde gerçekleştiğini, mikrobiyal niş ayrışmasının belirginleştiğini göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada biochar uygulamasının, özellikle fosforun sınırlı olduğu sistemlerde, toprakta mikrobiyal fosfor döngüsünü genetik düzeyde dönüştürerek ALP üretimini ve dolayısıyla organik P mineralizasyonunu desteklediği ortaya konmuştur. Bu da hem bitki fosfor alımını artırmakta hem de düşük fosfor girdili sürdürülebilir tarım sistemleri için stratejik bir yaklaşım sunmaktadır.

Becagli ve arkadaşları (2022), İtalya'nın Pisa bölgesine özgü serada yürüttükleri bu çalışmada, biochar ve vermiwash (solucan gübresi süzüntüsü) uygulamalarının toprakta

biyolojik aktiviteleri iyileştirme potansiyelini araştırmışlardır. Çalışmada, domates bitkisi (*Solanum lycopersicum* L.) yetiştirilen topraklarda %2 oranında biochar ve haftalık 25 mg/saksı dozunda vermiwash uygulamaları bireysel (B ve V) ve birlikte (BV) olarak değerlendirilmiş; bu uygulamaların toplam ve çözünmüş organik karbon, mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC) ile çeşitli enzimatik aktiviteler üzerindeki etkileri hem kök bölgesi (rizosfer) hem de yığın toprakta (bulk soil) incelenmiştir. Deneme sonuçlarına göre, hem B hem de V uygulamaları topraktaki organik karbon miktarını ve mikrobiyal biyokütleyi anlamlı düzeyde artırmıştır. Özellikle rizosfer bölgesinde, BV kombinasyonu ile MBC değeri 300 µg/g'a yaklaşılarak en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Enzimatik aktivite açısından değerlendirildiğinde, fosfataz, β-glukozidaz ve üreaz enzim aktiviteleri rizosferde belirgin şekilde artış göstermiş, bu artış V ve BV uygulamalarında daha belirgin olmuştur. Ancak bazı durumlarda biochar'ın tek başına uygulandığında dehidrogenaz enzimi gibi aktivitelere olumsuz etkiler yapabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca, üç temel enzimin bileşik etkisini ölçen Alterasyon İndeksi (AI3) sonuçları, özellikle BV kombinasyonunun, hem toprak organik maddesinin korunmasında hem de biyolojik kalitenin artırılmasında etkili olduğunu ortaya koymuştur. AI3 değerleri, uygulamalarla birlikte negatif yöne kayarak toprak kalitesinde iyileşme olduğunu göstermiştir. Elde edilen veriler, hem biochar'ın hem de vermiwash'ın ayrı ayrı faydalar sağladığını, birlikte kullanıldıklarında ise rizosfer bölgesinde sinerjik etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Bu bulgular, organik madde geri kazanımı ve toprak biyotasının uyarılması yoluyla, sürdürülebilir tarım sistemlerinde biochar ve vermiwash'ın birlikte kullanımının verimli bir uygulama stratejisi olabileceğini göstermektedir.

Lu ve arkadaşları (2022), Çin'in Hunan eyaletinde, ağır metal (özellikle Cd ve Zn) ile kontamine olmuş tarım topraklarında yürüttükleri çalışmada, biochar ve kompost uygulamalarının topraktaki alkalın fosfataz (ALP) aktivitesi, phoD geni taşıyan mikrobiyal topluluk yapısı ve fosfor dinamiği üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Deneysel uygulamalar, dört farklı muamele (kontrol, biochar, kompost, biochar + kompost) altında, 80 gün boyunca kontrollü bir iklim odasında gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde, özellikle kompost uygulamasının toprakta ALP aktivitesini istatistiksel olarak anlamlı düzeyde artırdığı gözlemlenmiştir. Kompostlu uygulamalarda ALP aktivitesindeki artış 30. günden itibaren belirgin hale gelmiş, biochar

uygulamasında ise bu artış gecikmeli olarak 50. günden itibaren gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, her iki uygulama da toprakta phoD gen bolluğunu anlamlı ölçüde artırmış, phoD geni ile alınabilir fosfor (AP), ALP aktivitesi ve elektriksel iletkenlik (EC) arasında pozitif korelasyonlar saptanmıştır (örneğin: phoD-AP,  $R^2 = 0.576$ ,  $p < 0.01$ ). Çalışmada yapılan Redundancy Analysis (RDA) ve ısı haritası analizlerine göre, phoD taşıyan mikrobiyal toplulukların kompozisyonu kompost uygulamasıyla belirgin şekilde değişmiş; özellikle Proteobacteria ve Actinobacteria üyeleri dominant hale gelmiştir. Biocharın ise phoD topluluğu üzerindeki etkisi sınırlı kalmış, bunun başlıca nedeni olarak biocharın düşük çözünür karbon ve sabit fosfor içeriği gösterilmiştir. Ayrıca, EC'nin phoD topluluk yapısını belirleyen en güçlü çevresel faktör olduğu ve bu özelliğin kompost uygulamasıyla doğrudan bağlantılı olduğu ortaya konmuştur. Kompost uygulamasının, toprak organik karbonunu (TOC), alınabilir fosforu (AP) ve mikrobiyal çeşitliliği artırarak, nadir phoD türlerinin daha rekabetçi hale gelmesini sağladığı rapor edilmiştir. Bu mikrobiyal yeniden yapılanma, ALP aktivitesini tetikleyerek fosfor mineralizasyonunu hızlandırmıştır. Sonuç olarak, kompost ve biochar uygulamalarının, ağır metalle kirlenmiş topraklarda fosfor döngüsünü yeniden düzenleyebildiğini, özellikle kompostun ALP aktivitesini ve phoD geni taşıyan mikrobiyal çeşitliliği artırarak P yarıyışlılığını desteklediğini ortaya koymuşlardır. Bu bulgular, hem fosfor yönetimi hem de toprak biyolojik iyileştirme açısından çevre dostu bir strateji geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Cao ve arkadaşları (2023), Çin'in Liaoning bölgesinde beş yıl süreyle yürüttükleri uzun dönemli tarla denemesinde, mısır sapından elde edilen biocharın fosfor (P) fraksiyonları, fosfataz aktivitesi ve  $^{31}\text{P}$  NMR spektral analizleri üzerinden toprak fosforu üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, iki farklı biochar dozu (0 ve  $2.63 \text{ t ha}^{-1}$ ) ile iki farklı fosfor gübresi seviyesi (0 ve  $26 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) kombine edilerek dört farklı uygulama oluşturulmuştur. Deneme sonucunda, biochar uygulamasının toprak pH'sını artırdığı ve toplam karbon ile toplam fosfor düzeylerini anlamlı şekilde yükselttiği belirlenmiştir. Kimyasal sıralı ekstraksiyon sonuçları, biocharın Ca-P, Al-P, Fe-P ve organik P (LOP, MLOP, HROP) fraksiyonlarını artırdığını ortaya koymuştur.  $^{31}\text{P}$  NMR analizleri ise, en yüksek orto-P ( $464.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ), monoester-P ( $74.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ve diester-P ( $13.9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) düzeylerinin biochar ve fosfor gübresinin birlikte uygulandığı parsellerde gözlemlendiğini göstermiştir. Ayrıca, biochar uygulaması topraktaki alkali

fosfomonoesteraz aktivitesini %24.4–32.7 oranında artırırken, fosfodiesteraz aktivitesini %10.2–11.0 oranında azaltmıştır. Yazarlar, kimyasal fraksiyonlama,  $^{31}\text{P}$  NMR ve enzim aktivite analizlerinin birlikte kullanılmasının, toprak fosforunun formu ve biyoerişilebilirliği hakkında daha bütüncül bir değerlendirme sağladığını belirtmektedir. Elde edilen bulgular, biocharın fosfor dönüşümlerini mikrobiyal ve kimyasal düzeyde etkileyerek sürdürülebilir gübre yönetimine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Das ve arkadaşları (2023), Hindistan'ın Sikkim eyaletinde, orta yamaç ekosisteminde yürüttükleri bir alan çalışmasında, farklı organik gübre kaynaklarının (ahır gübresi, tavuk gübresi, keçi gübresi, domuz gübresi ve vermikompost) tek başına ve mısır sapı biocharı ile birlikte uygulanmasının, toprak mikrobiyal biyokütlesi (MBC, MBN, MBP) ve çeşitli enzim aktiviteleri (dehidrogenaz, fosfataz, proteaz,  $\beta$ -glukosidaz vb.) üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. İki yıl süreyle yürütülen bu çalışmada, mısırsiyah fasulye münavebe sistemi esas alınmış ve 16 farklı uygulama karşılaştırılmıştır. Yürüttükleri bu araştırmada, hem gübre uygulamalarının hem de gübre + biochar kombinasyonlarının mikrobiyal biyokütle ve enzimatik aktivitelerde anlamlı artışlar sağladığı tespit edilmiştir. En yüksek MBC değeri keçi gübresi + biochar uygulamasında ( $476.58 \text{ mg kg}^{-1}$ ), en yüksek MBP değeri ise vermikompost + biochar kombinasyonunda ( $44.12 \text{ g kg}^{-1}$ ) elde edilmiştir. Aynı zamanda, dehidrogenaz aktivitesi de en yüksek değere ( $84.45 \text{ } \mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ saat}^{-1}$ ) yine vermikompost + biochar uygulamasında ulaşmıştır. Bu sonuçlar, biochar'ın mikrobiyal aktiviteyi ve mikrobiyal fosfor döngüsünü uyarıcı rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır. Enzimatik analizler sonucunda, biochar uygulamasıyla birlikte özellikle alkalın fosfataz, fosfodiesteraz ve proteaz aktivitelerinde belirgin artışlar gözlenmiştir. Buna karşın, artan biochar dozu ile asit fosfataz ve  $\beta$ -glukosidaz aktivitelerinde azalmalar tespit edilmiştir. Bu durum, biochar'ın enzim-substrat etkileşimlerinde yüzey özelliğine ve poroziteye bağlı olarak farklı tepkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Özellikle yüksek poroziteli biochar yüzeylerinin enzimleri adsorbe ederek aktiviteyi baskılayabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, çalışmada fluorescein diasetat (FDA), karbonhidrat (CHO), invertaz ve selüloz aktiviteleri gibi mikrobiyal metabolizma göstergeleri de değerlendirilmiş; FDA aktivitesinin en yüksek olduğu uygulama, ahır gübresi + biochar kombinasyonu olmuştur. Bu bulgular, hem biyolojik hem de biyokimyasal toprak sağlığı parametrelerinin biochar ve organik gübrelerin birlikte kullanımından olumlu yönde etkilendiğini ortaya koymaktadır. Son

olarak, mikrobiyal oran (qMB) verileri de analiz edilmiş ve biochar uygulama düzeyine bağlı olarak 2.5 t/ha düzeyinde artış, 5.0 t/ha düzeyinde ise azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, optimum biochar dozunun belirlenmesinin toprak biyolojik dengesini koruma açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Fei ve arkadaşları (2023), Çin'in Shandong bölgesindeki tuzlu-alkali pirinç tarlalarında beş yıl boyunca yürüttükleri çalışmada, inorganik NPK gübresine ek olarak uygulanan çeltik atığı ve çeltik samanı kökenli biochar'ın, toprak fosfor havuzları, mikrobiyal fosfor biyokütlesi (P<sub>mic</sub>), alınabilir fosfor (AP), fosfataz (ALP) aktivitesi ve phoD geni taşıyan mikrobiyal topluluk yapısı üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda, NPK (kimyasal gübre), NPK + saman (NPKS) ve NPK + biochar (NPKB) olmak üzere üç farklı gübreleme yönetimi karşılaştırılmıştır. Çalışmada, özellikle NPKS uygulamasının, P<sub>mic</sub>, AP ve ALP aktivitesini artırmada en etkili yöntem olduğu ortaya konmuştur. Beş yıllık uygulama sonunda NPKS grubu, kontrol grubuna kıyasla P<sub>mic</sub> içeriğini %104.4, ALP aktivitesini ise %49.07 oranında artırmıştır. Ayrıca, hasat atığı uygulamasının topraktaki çözünür organik karbon (DOC) içeriğini ve DOC:AP oranını önemli ölçüde artırdığı; bunun da phoD geni taşıyan bakteriyel topluluğun yapısını yeniden şekillendirdiği ve ALP aktivitesine doğrudan etki ettiği gösterilmiştir. Yapısal eşitlik modeli (SEM) analizine göre, phoD topluluk kompozisyonunun, gen bolluğu ve çeşitliliğine kıyasla ALP aktivitesi üzerinde daha güçlü bir belirleyici olduğu bulunmuştur. Özellikle hasat atığı uygulaması, *Streptomyces* ve *Pseudomonas* gibi karbonca zengin ortamları tercih eden fosfat mineralize edici bakterilerin yayılımını artırmış; bu sayede toprakta Po (organik fosfor) mineralizasyonu desteklenmiştir. Toprakta ALP aktivitesinin biochar uygulamasına kıyasla daha yüksek olmasının nedenleri arasında, samanın daha kolay ayrışabilir karbon sağlaması, humik-enzim komplekslerinin oluşumunu desteklemesi ve mikrobiyal çeşitliliği daha hızlı uyatarak phoD taşıyıcı türlerin fonksiyonel etkilerini öne çıkarması yer almıştır. Ayrıca, hasat atığı uygulaması, toplam bakteri ve phoD-harboring topluluk kompozisyonlarını biochar'a göre daha güçlü şekilde yeniden yapılandırarak P kullanılabilirliğini ve gübre kullanım verimliliğini artırmıştır. Sonuç olarak, hasat atığı uygulamasının yalnızca karbon kaynağı olarak değil, aynı zamanda mikrobiyal fosfor döngüsünü yönlendiren kilit fonksiyonel grupların aktivasyonunda da etkili bir araç olduğunu belirtmiş; bu yaklaşımın

sürdürülebilir fosfor gübreleme stratejileri açısından önemli potansiyel taşıdığını vurgulamışlardır.

Zhao ve arkadaşları (2023), Çin'in Heilongjiang bölgesinde yürüttükleri bu saksı denemesinde, mısır sapı kökenli biocharın (BC) ve doğal yaşlanmış biocharın (ABC), farklı düzeylerde kadmiyum (Cd) ile kontamine olmuş tarım topraklarında *Medicago sativa* L. (yonca) bitkisinin büyüme performansı, Cd birikimi, toprak enzim aktiviteleri ve mikrobiyal biyokütle üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, yaşlandırma işlemi için kuru-yaş ve don-çöz döngüleri kullanılarak biocharın doğal çevre koşullarında uğrayabileceği fizikokimyasal değişimler simüle edilmiştir. Yürütülen deneylerde, hem BC hem de ABC uygulamaları, yüksek Cd düzeyinde (3 mg/kg) yoncanın hem yukarı hem de aşağı toprak üstü biyokütlesini anlamlı şekilde artırmış; buna karşılık, bitki dokularındaki Cd birikimini sırasıyla %32.8 ve %35.1 oranlarında azaltmıştır. En yüksek Cd fiksasyonunun ABC ile sağlandığı, bunun da ABC'nin artan yüzey alanı, oksijen içeren fonksiyonel gruplar ve mineral bileşimindeki zenginleşmeden kaynaklandığı belirtilmiştir. Toprakta BC ve ABC uygulamaları sonrası, pH'da 0.32–0.36 birimlik artış, katyon değişim kapasitesinde (%CEC) %15.5 artış ve toprak organik madde (SOM) içeriğinde sırasıyla %5.7 ve %6.2 oranlarında iyileşmeler gözlenmiştir. Mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC) ve nitrojeni (MBN) ile toprak enzim aktiviteleri (ör. ureaz,  $\beta$ -glukozidaz, FDA) de özellikle Cd stresinde anlamlı düzeyde yükselmiştir. Bu durum, hem doğrudan Cd adsorpsiyonu hem de toprak ortamının iyileştirilmesiyle biyotik stresin azaltıldığını göstermektedir. Yapılan yapısal eşitlik modellemesi (SEM) analizine göre, BC ve ABC'nin alfalfa üzerinde oluşturduğu Cd azaltıcı etkinin, toprak pH'sı, SOM, CEC ve mikrobiyal enzim aktivitesi gibi faktörler üzerinden dolaylı olarak gerçekleştiği ortaya konmuştur. Ayrıca, random forest analizleri, SOM, toplam organik karbon (TOC) ve FDA enzim aktivitesinin, yonca sürgünlerindeki Cd içeriğini etkileyen en önemli değişkenler olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen bulgular, hem taze hem de yaşlandırılmış biochar uygulamalarının, kadmiyumla kirlenmiş topraklarda yalnızca ağır metalin yayılmasını azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda mikrobiyal işlevleri güçlendirerek bitki büyümesini destekleyebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle ABC'nin fizikokimyasal yapısal dönüşümü sayesinde daha etkili bir Cd fiksasyon kapasitesine sahip olduğu ve bu yönüyle sürdürülebilir toprak iyileştirme stratejilerinde önemli bir araç olabileceği ifade edilmiştir.

Wang ve arkadaşları (2024), Çin'in Shaanxi eyaletinde kadmiyumla (Cd) kirlenmiş tarım toprağında yürüttükleri bu çalışmada, fosforla modifiye edilmiş biochar (PBC) uygulamasının toprakta Cd immobilizasyonuna, phoD geni taşıyan mikrobiyal topluluk yapısına ve alkali fosfataz (ALP) aktivitesine olan etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, elma ağacı dallarından elde edilen odun kökenli biochar, piroliz öncesi tripotasyum fosfat ( $K_3PO_4$ ) ile muamele edilerek fosforca zenginleştirilmiş; ardından bu materyal, Cd içeriği yüksek tarım toprağına uygulanarak kontrol, sadece biochar (BC), sadece fosfat (PM), fosfat + biochar (PB) ve fosfatla zenginleştirilmiş biochar (PBC) olmak üzere beş farklı muamele grubu oluşturulmuştur. Yürütülen çalışmada, PBC uygulamasının toprakta alınabilir Cd içeriğini %69.77 oranında azaltarak en yüksek immobilizasyon etkisini sağladığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, hem bulk hem de rizosfer toprakta toplam fosfor (TP), alınabilir fosfor (AP) ve özellikle organik fosfor (OP) miktarlarında kayda değer artışlar elde edilmiştir. Bu artışlar, ALP enzim aktivitesinin uyarılmasına ve mikrobiyal fosfor mineralizasyon potansiyelinin güçlenmesine yol açmıştır. ALP aktivitesinin BC grubunda en yüksek seviyeye ulaştığı; ancak PBC uygulamasının daha dengeli bir mikrobiyal yapı oluşturarak fosfat döngüsüne daha uzun vadeli katkı sunduğu belirtilmiştir. Çalışmada özellikle phoD genine sahip mikroorganizmaların, ALP aktivitesi üzerindeki belirleyici rolü vurgulanmış; PBC uygulamasının *Priestia* ve *Massilia* cinslerinin toprakta baskın hale gelmesini sağladığı ve bu cinslerin ALP aktivitesinin ana düzenleyicileri olduğu gösterilmiştir. Yapılan korelasyon analizlerinde, rizosferde *Priestia*'nın, bulk toprakta ise *Massilia*'nın ALP aktivitesi ile pozitif yönde anlamlı ilişkide olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, bu iki cinsin Cd varlığında daha aktif hale geldiği ve Cd stresine karşı tolerans geliştirdiği raporlanmıştır. Wang ve arkadaşları (2023), Çin'in Hunan Eyaleti'nde yürüttükleri uzun dönemli tarla denemelerinde, biochar ve organik gübrelerin eş zamanlı kullanımının mısır (*Zea mays* L.) verimi ve toprak fosfor döngüsü üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, sekiz yıl süresince uygulanan beş farklı gübreleme rejimi kapsamında; mineral gübre (CF), mineral gübre + biochar (BF), organik gübre ile azotun %20'sinin ikamesi (OF) ve bu uygulamaya ek olarak biochar (BOF) kombinasyonları değerlendirilmiştir. Araştırmacılar, BOF uygulamasında toprakta labil fosfor fraksiyonlarının %12–23 oranında arttığını, stabil fosfor bileşenlerinin ise %13–19 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Aynı zamanda, toprakta asit ve alkali fosfataz

aktivitelerinin (ACP, ALP) %44'e kadar yükseldiği ve phoD, phoX, phnK ve ppx gibi fosfor kazanımına yönelik gen bolluklarında önemli artışların sağlandığı tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, bu mikrobiyal ve enzimatik aktivite artışlarının bitki fosfor alımı ve tane verimi ile güçlü pozitif ilişkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışma sonuçları, yalnızca fosfor havuzu bileşiminde meydana gelen değişikliklerin değil, mikroorganizma aracılı fosfor dönüşümlerinin de mısır veriminde belirleyici olduğunu vurgulamaktadır. Uzun vadeli bulgular, biochar ve organik gübrelerin birlikte kullanımının, mikrobiyal fosfor madenciliğini destekleyerek fosfor kullanım verimliliğini artırabileceğini ve sürdürülebilir gübre yönetimi stratejilerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Vermikompost, yüksek mikrobiyal aktivitesi sayesinde organik fosforu mineralize ederek bitki tarafından alınabilir hale getirir.

Busato ve arkadaşları (2016), şeker kamışı endüstrisi atığı olan filtre keki (FC) ile sığır gübresinin (CM) vermikompostlaşma sürecinde fosfataz enzim aktiviteleri ile fiziksel ve kimyasal parametreler arasındaki ilişkileri araştırmıştır. Çalışmada, toplam organik karbon (TOC), toplam azot (TNC), humik asit (HA), suyla çözünebilen fosfor (WSP), nanogözenek hacmi ve fosfataz aktiviteleri gibi çeşitli değişkenler 120 günlük süreçte değerlendirilmiştir. Sonuçlar, FC'nin CM'ye kıyasla daha yüksek başlangıç TNC, TOC, HA içeriği ve fosfataz aktivitesine sahip olduğunu göstermiştir. FC'nin TOC değeri %10 azalmışken, CM'de bu oran %32.5'e ulaşmıştır. Asidik ve alkali fosfataz aktiviteleri, özellikle ilk 30 günde yüksek olup sonraki günlerde düşüş göstermiştir. FC'de fosfataz aktivitesi, CM'ye kıyasla 120. günde sırasıyla %263 ve %175 daha yüksek bulunmuştur. Korelasyon analizleri, fosfataz aktivitelerinin TOC, pH ve WSP ile pozitif; HA içeriği ve nanogözenek hacmiyle negatif ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. FC'deki yüksek nanoporozite, enzimlerin gözenek içine girişini engelleyerek fiziksel koruma sağlarken, CM'de artan hidrofobik yapı enzim aktivitesini kimyasal yolla baskılamış olabilir. Bu çalışma, stabilize olmuş atıkların fosfor mineralizasyonunda fiziksel koruma faktörlerinin, daha az stabilize atıklarda ise kimyasal faktörlerin fosfataz aktivitesini sınırlayıcı ana etmenler olabileceğini göstermektedir. Sonuçlar, organik atıkların verimli şekilde yeniden kullanımı için enzim aktivitesini etkileyen yapısal faktörlerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Lukashe ve arkadaşları (2019), uçucu kül, büyükbaş hayvan gübresi ve atık kağıttan oluşturulan kompost karışımına fosfat çözümleyici bakteri (*Pseudomonas fluorescens*) inokulasyonu ile *Eisenia fetida* türü toprak solucanlarının birlikte uygulanmasının, verimikompostlaşma süreci üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, kompost olgunlaşması, besin elementlerinin mineralizasyonu ve biyolojik aktivite (özellikle enzimatik) bağlamında değerlendirme yapmıştır. Sonuçlar, *E. fetida* + *P. fluorescens* kombinasyonunun C/N oranını %62.3 oranında düşürerek 11'e kadar daralttığını ve bu değerin kontrol grubuna göre %38 daha düşük olduğunu göstermiştir. En yüksek Olsen-P düzeyi de bu kombinasyonla elde edilmiş ve kontrol grubuna göre %48.3 daha yüksek bulunmuştur. Ek olarak, *P. fluorescens* inokulasyonu FDA enzim aktivitesini artırmış, ancak alkali fosfataz aktivitesinde azalmaya neden olmuştur. Mikrobiyal büyüme açısından ise en yüksek koloni yoğunluğu *E. fetida* içeren uygulamalarda gözlenmiştir. Bu bulgular, *E. fetida* ve *P. fluorescens* etkileşiminin, özellikle uçucu kül gibi inorganik atıklarla zenginleştirilmiş organik materyallerin verimikompostlaştırılmasında biyobozunmayı hızlandırdığını, fosfor mobilizasyonunu iyileştirdiğini ve mikrobiyal aktiviteyi artırdığını göstermektedir. Yazarlar, gelecekte bu tür bakterilerin farklı dozlarda uygulanmasının veya azot fiksleyen bakterilerle kombinasyonlarının da test edilmesini önermektedir.

Busato ve arkadaşları (2020), kaya fosfatı (RP) ile zenginleştirilmiş verimikompost sürecinde *Trichoderma asperellum* ve *T. virens* türlerinin tekil veya kombine uygulamalarla organik maddenin stabilize edilme süresini kısaltma ve bitki tarafından alınabilir fosfor (özellikle sitrik asitte çözünebilen P) düzeyini artırma potansiyelini araştırmışlardır. Çalışmada, sığır gübresi ve kaya fosfat karışımı içeren verimikompost ortamına bu *Trichoderma* türleri uygulanarak 120 gün süresince izlenmiştir. Araştırma sonucunda, *Trichoderma asperellum* ve *T. virens*'in birlikte uygulandığı kombinasyon (VC+RP+TA+TV), toplam organik karbon (TOC) seviyesinde %35.1'lik azalma ve humik asit (HA) içeriğinde %38.2'lik artış ile en yüksek stabilizasyonu sağlamıştır. HA/FA oranına göre stabilite indeksi açısından yalnızca kombine uygulama ve *T. virens* uygulaması 120 gün sonunda olgunluk kriterini sağlamıştır. Ayrıca, *T. asperellum* uygulaması, sitrik asitte çözünebilen fosforu %83.2 oranında artırarak fosfor çözünürlüğü bakımından en başarılı uygulama olmuştur. Alkaline fosfataz enzim aktivitesi, özellikle kombinasyon uygulamasında %26'lık artış göstermiştir; bu da mikrobiyal fosfat



mikrobiyal çeşitliliği artırdığı, enzimatik faaliyetleri uyardığı, bazı fitopatojenleri baskıladığı ve toprak biyolojik sağlığını iyileştirdiği ifade edilmiştir.

Saha ve arkadaşları (2008), Hindistan Himalayaları'na özgü tarım koşullarında üç yıllık bir arazi çalışması yürüterek, farklı organik kompost kaynaklarının [ahır gübresi - FYM, solucan gübresi - vermikompost ve Lantana bitkisi (mine bitkisi olarakta bilinen çalı formunda istilacı bir bitkidir) kompostu] toprakta fosfataz enzim aktiviteleri ve fosfor (P) dönüşüm süreçleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Denemelerde her bir kompost dört farklı dozda uygulanmış ve elde edilen sonuçlar mikrobiyal biyokütle P, kullanılabilir P ve çeşitli fosfataz (asidik, alkalın, fosfodiesteraz, inorganik pirofosfataz) aktiviteleri ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma sonucunda, özellikle vermikompost uygulamalarının, diğer kaynaklara kıyasla toprakta mikrobiyal biyokütle P ve asit fosfataz aktivitesini daha fazla artırdığı belirlenmiştir. Vermikompostun en yüksek dozunda mikrobiyal biyokütle P değeri  $11.7 \text{ g kg}^{-1}$  ve kullanılabilir P  $24.0 \text{ g kg}^{-1}$  olarak ölçülmüş; aynı zamanda en yüksek asidik fosfataz aktivitesi bu uygulamada gözlemlenmiştir. FYM uygulamaları da olumlu etkiler göstermiştir, ancak bu etkiler dozla birlikte azalma eğilimindedir. Mine çalısı kompostu ise özellikle yüksek dozlarda kullanıldığında mikrobiyal aktivite ve fosfor dönüşüm süreçleri üzerinde toksik/allelopatik etkilere neden olmuş, bu durum negatif korelasyonlarla da desteklenmiştir. İstatistiksel analizler, FYM ve vermikompost uygulamalarında mikrobiyal biyokütle P ile fosfataz aktiviteleri arasında anlamlı pozitif ilişkiler bulunduğunu; buna karşın Mine çalısı kompostunda bu ilişkilerin çoğunlukla negatif olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, toprak organik karbon içeriği ile fosfataz aktiviteleri arasında FYM ve vermikompost için pozitif korelasyonlar gözlenmiş, Mine çalısı kompostu ile bu ilişki kurulamamıştır. Bu bulgular, vermikompostun özellikle P dönüşümünü hızlandırarak mikrobiyal biyolojik aktiviteleri desteklemede etkili olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Mine çalısı kompostu gibi bazı bitki kökenli materyallerin yüksek dozlarının toprak biyotasına zarar verebileceği vurgulanmıştır.

Pramanik ve arkadaşları (2009), Hindistan'ın Kalküta kentinde gerçekleştirdikleri çalışmada, farklı organik atıkların vermikompostlama sürecinde, seçilmiş mikroorganizmalarla inokulasyonun asit fosfataz aktivitesi, mikrobiyal biyokütle (MBC, MBN) ve mikrobiyal solunum üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, sığır gübresi ve çim atıkları olmak üzere iki farklı organik atık kaynağı

kullanılmış; bu atıklar, üç farklı mikrobiyal inokulant (*Trichoderma viridae*, *Bacillus polymyxa*, *Phanerochaete chrysosporium*) ile zenginleştirilerek *Eisenia fetida* türü toprak solucanı eşliğinde vermikompostlanmıştır. Araştırmacılar, bu çalışmada yürüttükleri deneyler sonucunda, mikrobiyal inokulasyonun humik asit içeriğini ve özellikle asit fosfataz aktivitesini önemli düzeyde artırdığını tespit etmişlerdir. En yüksek asit fosfataz aktivitesi, *Trichoderma viridae* ile inokule edilen sığır gübresi vermikompostunda ölçülmüştür ( $224.44 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ saat}^{-1}$ ). Ayrıca bu uygulamada, toplam izozim band yoğunluğu da en yüksek seviyede bulunmuş ve asit fosfataz izozimlerinin (Grup I, II ve III) varlığı elektroforetik olarak doğrulanmıştır. Mikrobiyal biyokütle analizlerinde, en yüksek MBC ve MBN değerleri *Bacillus polymyxa* inokulantıyla hazırlanan sığır gübresi bazlı vermikompostlarda gözlenmiştir (MBC:  $4194 \mu\text{g g}^{-1}$ , MBN:  $104 \mu\text{g g}^{-1}$ ). Bununla birlikte, mikroorganizmasız kontrol grupları ile kıyaslandığında tüm inokulasyonlar biyolojik parametrelerde anlamlı artış sağlamıştır. Ancak vermikompostlama süreci sonunda, substratın solucanların sindirim sisteminden geçişi nedeniyle MBC değerinde kısmi bir düşüş meydana gelmiştir. Buna rağmen, mikroorganizma inokulasyonu, toplam mikrobiyal solunumu ve metabolik oranı ( $\text{qCO}_2$ ) önemli ölçüde artırmıştır. Bu çalışmada dikkat çeken bir diğer sonuç ise mikrobiyal solunum ile asit fosfataz aktivitesi arasında ( $r = 0.932$ ), ayrıca toplam izozim band yoğunluğu ile asit fosfataz aktivitesi arasında ( $r = 0.964$ ) pozitif yönde güçlü korelasyonların bulunmasıdır. Bu durum, mikrobiyal topluluğun enzim üretimini doğrudan etkilediğini ve bu etkinin özellikle mantar inokulantları (*T. viridae* ve *P. chrysosporium*) ile daha güçlü olduğunu göstermektedir. Ayrıca, mantar grubu inokulantların Grup I izozimini sentezleyebilme özelliğine sahip olması, fosfataz aktivitelerinin yüksekliğini açıklayan önemli bir biyokimyasal mekanizma olarak değerlendirilmiştir. Mikroorganizma ile zenginleştirilmiş vermikompostlamanın, yalnızca toprak organik madde dönüşümünü değil, aynı zamanda fosfat çözünürlüğünü artıran enzimatik aktiviteleri de güçlendirdiğini ortaya koymuşlardır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir fosfor gübreleme stratejileri ve mikrobiyal enzim fonksiyonlarının yönetimi açısından önemli bir uygulama potansiyeli sunmaktadır. Bhavya ve arkadaşları (2018), Hindistan'ın Telangana eyaletinde yürüttükleri çalışmada, farklı fosfor dozları ile birlikte fosfat çözücü bakteri (PSB) ve vermicompost uygulamalarının, yeşil mercimek (*Vigna radiata* L.) bitkisinin verimi ve toprakta asit ve alkali fosfataz enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Arazi

koşullarında yürütülen deneme, tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak planlanmıştır; üç düzeyde fosfor (0, %75 ve %100 RDP), PSB inokulasyonu (2 kg/ha) ve vermicompost (5 ton/ha) tek başına veya kombinasyonlar halinde uygulanarak toplam 12 farklı muamele karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgulara göre, yalnızca inorganik fosfor uygulaması (özellikle %100 RDP) hem asit hem de alkali fosfataz aktivitelerinde belirgin bir düşüşe neden olmuştur. Örneğin, %100 RDP uygulamasında (T9), çiçeklenme döneminde asit fosfataz aktivitesi  $88.00 \mu\text{g PNP g}^{-1}$  toprak  $\text{h}^{-1}$ , alkali fosfataz ise  $232.00 \mu\text{g PNP g}^{-1}$  toprak  $\text{h}^{-1}$  olarak ölçülmüş ve bu değerler kontrol uygulamasının altında kalmıştır. Buna karşılık, PSB ve vermicompostun birlikte uygulandığı muamele (T4) her iki enzim için de en yüksek aktiviteyi sağlamıştır (asit fosfataz:  $151.33 \mu\text{g}$ ; alkali fosfataz:  $277.33 \mu\text{g PNP g}^{-1}$  toprak  $\text{h}^{-1}$ ). Fosfat çözücü bakterilerin organik asit salınımı yoluyla toprak pH'sını düşürmesi ve fosfor çözünürlüğünü artırması, enzim aktivitesindeki bu artışı açıklayan temel mekanizma olarak sunulmuştur. Ayrıca, vermicompostun toprakta mikrobiyal yoğunluğu artırarak fosfataz enzim üretimini desteklediği, özellikle düşük fosfor koşullarında PSB'nin daha aktif olduğu belirtilmiştir. Bu sinerjik etki, mikrobiyal yapıların toprak fosfor döngüsüne katkısını göstermesi açısından önemlidir. Verim bileşenleri açısından değerlendirildiğinde, en yüksek tane ve sap verimi, %100 RDP + PSB + vermicompost kombinasyonunda (T12) elde edilmiştir (tane verimi:  $1033.33 \text{ kg/ha}$ ; sap verimi:  $1625.66 \text{ kg/ha}$ ). Bu değer, kontrol uygulamasına göre %46.92 oranında verim artışı anlamına gelmektedir. Fosforun kök nodülasyonu ve simbiyotik azot fiksasyonu üzerindeki olumlu etkisiyle birlikte, artan fotosentetik aktivitenin verim artışında belirleyici olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak Bhavya ve arkadaşları (2018), fosfor gübrelemesinde organik ve biyolojik girdilerin birlikte kullanımının, yalnızca verimi artırmakla kalmayıp, aynı zamanda toprakta fosfataz enzim aktivitelerini yükselterek fosfor mineralizasyonunu teşvik ettiğini ortaya koymuşlardır. Bu sonuçlar, sürdürülebilir tarım uygulamalarında entegre fosfor yönetiminin önemini vurgulamaktadır.

Boruah ve Deka (2023), Hindistan'ın Assam bölgesinde yürüttükleri çalışmada, tahıl işleme endüstrisinden kaynaklanan atık çamurun vermikompostlanması sürecinde üç farklı epijeik toprak solucanı türünün (*Eisenia fetida*, *Eudrilus eugeniae* ve *Perionyx excavatus*) enzimatik aktivite dinamikleri üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Araştırmanın temel amacı, farklı türlerin organik atık ayrışması sürecinde

oluşturduğu sinerjik enzim tepkilerini takip ederek, kompost olgunluğunu fiziksel göstergelere ihtiyaç duymadan yalnızca biyokimyasal parametrelerle belirlemektir. Çalışma, tahıl atıkları (CGPIS) ve %5 oranında inek gübresi karışımı kullanılarak kurulan küçük ölçekli vermireaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Her solucan türü ayrı vermireaktöre yerleştirilmiş ve enzim aktiviteleri (cellulase, amylase, invertase, phosphatase, protease, dehydrogenase, urease) 15 günlük aralıklarla 135 güne kadar izlenmiştir. Sonuçlara göre, enzim aktiviteleri genel olarak üç fazda ilerlemiştir: ilk 30 günde düşük düzeyde aktivite, sonraki 45 günde keskin bir artış ve ardından hasat öncesi dönemde sabitlenme veya düşüş. *Eisenia fetida* türü, özellikle amilaz, invertaz, selüloz ve fosfataz aktivitelerinde en yüksek değerleri göstermiş; bu da söz konusu türün tahıl atığı gibi karbon zengini materyallerin dönüşümünde daha etkin olduğunu ortaya koymuştur. Maksimum değerler arasında örneğin, amilaz için 878.96 µg, selüloz için 128.09 µg ve invertaz için 841.65 µg/g/h aktivite kaydedilmiştir. Diğer türlerden *E. eugeniae* ve *P. excavatus* ise orta ve düşük düzeyde enzimatik performans sergilemiştir. Çalışmanın en özgün yönlerinden biri, enzim aktiviteleri arasındaki korelasyonların Principal Component Analysis (PCA) ile değerlendirilmiş olmasıdır. Bu analizler sonucunda *Eisenia fetida* içeren sistemde invertaz, selüloz ve amilaz arasında pozitif sinerji gözlenirken, dehidrogenaz ve üreaz ile negatif korelasyonlar tespit edilmiştir. *Eudrilus eugeniae* ve *Perionyx excavatus* içeren sistemlerde ise dehidrogenaz ve proteaz aktiviteleri baskın rol oynamış, diğer enzimlerle olan ilişkiler zayıf bulunmuştur. Bu bulgular, vermikompostlama sürecinin yalnızca substratın dönüşümünü değil, aynı zamanda farklı enzimatik yollarla ilerleyen karmaşık mikrobiyal etkileşimleri de içerdiğini göstermektedir. Çalışma sonucunda *Eisenia fetida*'nın, özellikle tahıl endüstrisi atıkları gibi karbonca zengin materyallerin biyolojik dönüşümünde en etkili tür olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, fiziksel olgunluk belirtileri oluşmadan önce, enzimatik aktivite dinamiklerinin kompost olgunluğunu doğru bir şekilde gösterebildiği doğrulanmıştır.

Ekka, Singh ve Patel (2023), Hindistan'ın Chhattisgarh bölgesinde, aside eğilimli bir İnceptisol toprakta yürüttükleri iki yıllık tarla denemesinde, uçucu kül (fly ash), kireç ve vermikompost uygulamalarının pirinç tarımında toprak enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırma, KVK-Katghora (Korba) deneme alanında gerçekleştirilmiş ve Indira Aerobic-1 çeşidi pirinç kullanılmıştır. Toplam on iki farklı gübreleme stratejisinin karşılaştırıldığı bu çalışmada, uygulamalar %100 önerilen doz

gübre (RDF), %75 RDF + 2 t/ha kireç, 20 veya 40 t/ha uçucu kül ve 2 t/ha vermikompost kombinasyonlarını içermektedir. Denemeler tesadüf blokları deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak yürütülmüş ve özellikle iki toprak enzimi olan üreaz ve dehidrogenaz aktiviteleri izlenmiştir. Bulgular, en yüksek enzim aktivitelerinin T12 uygulamasında (%75 RDF + 40 t/ha uçucu kül + 2 t/ha kireç + 2 t/ha vermikompost) elde edildiğini göstermiştir. T12, istatistiksel olarak T8 (20 t/ha uçucu kül + kireç + vermikompost) ve T6 uygulamaları ile benzer sonuçlar göstermiştir. En düşük enzim aktiviteleri ise kontrol grubunda (T1) gözlenmiştir. Araştırmada elde edilen bu artışlar, uygulanan organik ve inorganik materyallerin mikrobiyal faaliyetleri teşvik etmesi, toprak pH'ını düzenlemesi ve mikrobiyal substrat mevcudiyetini artırması ile açıklanmıştır. Vermikompost ise organik karbon ve besin elementi zenginliğiyle mikrobiyal biyokütlenin artmasına ve bu sayede enzimatik süreçlerin ivmelenmesine katkı sağlamıştır. Bu çalışma, aside eğilimli tarım topraklarında uçucu külün geri kazanımı ve biyolojik gübrelerin birlikte kullanımı ile toprak enzimatif aktivitesinin artırılabilirliğini, bunun da sürdürülebilir pirinç üretimi için çevresel ve tarımsal açıdan değerli bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

Gong ve arkadaşları (2023), Çin'in Sichuan bölgesine ait koşullarda yürüttükleri çalışmada, beyaz şarap üretiminden arta kalan tahıl atıklarının (WWDG) *Eisenia fetida* ile vermikompostlanabilirliğini artırmak amacıyla yeşil atık (GW), yeşil atık kompostu (GWC) ve inek gübresi (CD) ilavesinin etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Bu araştırmanın temel amacı, yüksek asiditeye sahip olan WWDG materyalinin, toprak solucanlarının yaşaması ve organik maddenin stabilize edilmesi açısından uygun hale getirilmesini sağlamaktır. Dört farklı uygulamanın karşılaştırıldığı bu 60 günlük denemede; (CK: %100 WWDG, T1: %50 WWDG + %50 GW, T2: %50 WWDG + %50 GWC, T3: %50 WWDG + %50 CD), solucan hayatta kalma oranı, biyokütle artışı, kokon ve yavru sayısı gibi biyolojik göstergeler ile birlikte toprak enzim aktiviteleri (dehidrogenaz, fosfataz, üreaz), fizikokimyasal parametreler (pH, TOC, TN, TP, AK, HA), mikrobiyal çeşitlilik ve bitki gelişimi izlenmiştir. Sonuçlara göre, %100 WWDG ile yapılan kontrol grubunda (CK) solucanlar hayatta kalamazken, özellikle T2 (%50 GWC) ve T3 (%50 CD) uygulamaları hem solucanların biyokütlesini hem de üreme kapasitesini anlamlı şekilde artırmıştır. T2 uygulamasında en yüksek dehidrogenaz (maks. 15.6 mg TPF g<sup>-1</sup> 24h<sup>-1</sup>), fosfataz (maks. 61.98 mg PNP g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) ve üreaz (maks. 19.87 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup> g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) aktiviteleri ölçülmüş; bu da organik maddenin daha hızlı ayrıştığını ve mikrobiyal

aktivitenin yoğunlaştığını göstermiştir. Tüm katkı uygulamaları (T1–T3), kontrol grubuna kıyasla toplam organik karbon (TOC) kaybını (%46–47), toplam ve alınabilir azot, fosfor, potasyum içeriklerini ve humik asit düzeylerini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle T2 grubunda  $\text{NO}_3^-$ -N düzeyleri 1210.68 mg/kg'a ulaşarak olgun kompost göstergesi olarak kabul edilen değerin çok üzerine çıkmıştır. Olgunluk göstergesi olan çimlenme indeksi (GI) de bu grupta %145.6 ile en yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. Mikrobiyal çeşitlilik analizinde, katkı maddeleri sayesinde bakteriyel zenginlik (Chao1, Shannon indeksi) artmış; Streptomyces, Bacillus, Rhodanobacter, Luteibacter gibi biyo-kontrol ve lignoselüloz parçalayıcı türlerin oranı yükselmiştir. Bu türlerin varlığı, hem bitki hastalıklarının baskılanmasında hem de organik madde dönüşümünde ekolojik işlevlere sahiptir. Son olarak, T2 ile elde edilen vermikompost, hem domates hem de marul fidelerinde en yüksek çimlenme oranı, bitki boyu, taze ağırlık ve klorofil içeriği gibi agronomik performansları sağlamıştır. Bu da GWC katkısının, sadece kompost kalitesini değil, aynı zamanda bitki gelişimini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, WWDG gibi endüstriyel asidik atıkların, uygun organik katkılarla (özellikle GWC) birlikte vermikompostlanmasının, çevresel toksisiteyi azaltabileceğini, toprak sağlığına katkı sağlayan yüksek kaliteli bir organik gübre üretimi sağlayabileceğini göstermektedir.

Jha, Kumar ve arkadaşları (2023), Hindistan'ın Bihar eyaletine ait kireçli alüvyal topraklarında yürüttükleri bu iki yıllık arazi çalışmasında, kaya fosfatı ile zenginleştirilmiş vermikompostun inorganik gübrelerle birlikte uygulanmasının, mısır (*Zea mays* L.) yetiştiriciliğinde toprak biyolojik kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, evsel ve tarımsal artık bazlı vermikompostlar, kaya fosfat (RP) ve çinko (Zn) sülfat ile zenginleştirilmiş, farklı kombinasyonlarda önerilen azot dozlarının %75'i ile birlikte uygulanmıştır. Denemeler tesadüf blokları deneme desenine göre kurulmuş ve 8 farklı gübreleme stratejisi karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, kaya fosfatla zenginleştirilmiş vermikompostun özellikle çinko sülfatla birlikte uygulanması durumunda toprak organik karbonu (SOC), mikrobiyal biyokütle karbonu (SMBC), toprak solunumu ( $\text{CO}_2$  evrimi), dehidrogenaz (DHA) ve fosfataz enzim aktivitelerinde anlamlı artışlar sağladığını göstermiştir. En yüksek değerler, evsel atık kaynaklı RP zenginleştirilmiş vermikompost ve tam doz çinko içeren T8 (0.60–0.61% SOC, 282.82–290.58  $\mu\text{g g}^{-1}$  SMBC) ve T5 (0.58–0.60% SOC, 270.91–275.94  $\mu\text{g g}^{-1}$

SMBC) uygulamalarında elde edilmiştir. Toprak solunumu T5 uygulamasında en yüksek düzeye ulaşmış ( $1.06-1.26 \text{ mg CO}_2 \text{ g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ), bu da mikrobiyal aktivitenin arttığını ve organik maddenin daha etkin ayrıştığını göstermektedir. Fosfor döngüsüyle ilişkili enzimatik göstergeler de önemli bulgular sunmuştur. Alkali fosfataz aktivitesi T8 uygulamasında en yüksek seviyeye ulaşmış ( $49.56 \text{ } \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), bu durum kaya fosfatın çözünmesini kolaylaştıran mikrobiyal mekanizmaların devreye girdiğini göstermektedir. Benzer şekilde asidik fosfataz aktivitesi de en yüksek düzeye T5 uygulamasında ulaşmıştır ( $31.23 \text{ } \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), bu da toprak pH'ı ile fosfataz enzimleri arasındaki ilişkinin altını çizmektedir. Bu sonuçlar, organik ve inorganik girdilerin entegre kullanımının, özellikle kaya fosfat ve çinko gibi stratejik girdilerle birlikte uygulandığında, kireçli toprakların mikrobiyal canlılığını ve enzimatik işleyişini iyileştirebileceğini göstermektedir. Çalışma, entegre besin yönetimi yaklaşımlarının toprak biyolojik kalitesini artırarak sürdürülebilir mısır üretimine katkı sunabileceğini ortaya koymaktadır.

Kocaman ve arkadaşları (2023), bu çalışmada, Türkiye’de çay fabrikalarından elde edilen ham çay atıklarının (raw tea waste), solucanlar, faydalı mikroorganizmalar ve özel enzimler aracılığıyla hızlandırılmış biyoteknolojik yöntemlerle mineralize edilerek bitki dostu vermikompost gübresine dönüştürülmesini amaçlamışlardır. Araştırma, döngüsel ekonomi yaklaşımını temel alarak sürdürülebilir atık yönetimi ve rejeneratif tarım ilkeleri doğrultusunda tasarlanmıştır. Denemeler, Kocaeli ili Kandıra ilçesinde bulunan bir kompost tesisinde gerçekleştirilmiş; kompostlar üç farklı biyolojik etkileşim faktörüne göre oluşturulmuştur: yalnızca solucan içeren (F1D), solucan + PGPR (bitki büyümesini teşvik eden rizobakteriler) içeren (F2D) ve solucan + PGPR + enzim içeren (F3D) kombinasyonlar. Her faktörde çay atığı ve mantar kompostu farklı oranlarda karıştırılmış (örneğin F3D5: %30 çay atığı + %70 mantar atığı) ve üç ay boyunca düzenli havalandırma ve karıştırma ile işlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, en başarılı mineralizasyon, F3 faktöründe, özellikle F3D4 (%40 çay atığı + %60 mantar atığı + solucan + PGPR + enzim) ve F3D5 (%30 çay atığı + %70 mantar atığı + solucan + PGPR + enzim) uygulamalarıyla sağlanmıştır. Bu uygulamalarda organik madde (OM) oranı %40–43 oranında düşerken, C/N oranı sırasıyla 9.14 ve 8.31 seviyelerine gerilemiştir ki bu değerler, olgun vermikompost için ideal sınır olan <12’nin altında yer almaktadır. Aynı gruplarda toplam azot, fosfor ve potasyum konsantrasyonlarında anlamlı artışlar

gözenmiştir (örn.  $P_2O_5$ : %285'e kadar,  $K_2O$ : %32'ye kadar). Ayrıca, bu uygulamalarda çözünür  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$  ve P değerlerinde de kayda değer artışlar saptanmış ( $NH_4^+$ : %477,  $NO_3^-$ : %125, çözünür P: %115), pH 7.5–7.8 aralığına ulaşmış ve elektriksel iletkenlik (EC) değeri maksimum 1.63 mS/cm ile tarımsal kullanım sınırları içinde kalmıştır. Katyon değişim kapasitesi (CEC) artarken, hacimsel yoğunluk ve özgül ağırlık azalmış; bu da yapısal olarak daha hafif, su tutma kapasitesi yüksek ve hava geçirgenliği artmış bir kompost üretildiğini göstermektedir. Mikro element analizlerinde, özellikle demir, çinko ve bakır konsantrasyonlarında artış gözlenmiş fakat bu artışlar fitotoksik seviyelere ulaşmamış, bitki büyümesine zarar verecek düzeyde olmamıştır. Bu durum, ağır metal içeriği açısından da güvenli ve bitki dostu bir gübre üretildiğini göstermektedir. Sonuçlar, enzim ve mikrobiyal katkılı solucanlı kompostlama teknolojisinin, yüksek besin değerine sahip, olgun ve çevre dostu bir organik gübre üretimi açısından etkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle F3D4 karışım oranı, hem kalite hem de ekonomik mineralizasyon süresi açısından en uygun seçenek olarak ön plana çıkmaktadır. Artan çay tüketimine paralel olarak ortaya çıkan çay atıklarının sürdürülebilir şekilde değerlendirilmesi açısından bu yaklaşım, rejeneratif tarım sistemlerinde önemli bir katkı sağlayabilir.

Kumar ve arkadaşları (2023), iki farklı organik atık kaynağı (evsel atık ve organik tarımsal atık) kullanarak kaya fosfatı (rock phosphate) ile zenginleştirilmiş vermikompost üretiminin, olgunluk ve stabilite göstergeleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. *Eisenia fetida* türü toprak solucanlarının kullanıldığı çalışmada, kaya fosfatı takviyesi yapılan ve yapılmayan kompostlar 120 gün boyunca takip edilmiştir. Araştırma bulgularına göre, kaya fosfatı ile zenginleştirilen evsel atık bazlı vermikompost, hem fiziksel hem de biyokimyasal özellikler bakımından en yüksek kaliteye ulaşmıştır. Kompostlama süreci ilerledikçe, su tutma kapasitesi ve katyon değişim kapasitesi artarken, pH, hacim ağırlığı, toplam organik karbon ve karbon/azot oranı düşmüştür. Kaya fosfatı katkısı özellikle fosfor içeriğini %106 (evsel atık) ve %120 (organik atık) oranlarında artırmıştır. Ayrıca, kaya fosfatı katkılı uygulamalarda  $CO_2$  salımı, dehidrogenaz ve alkali fosfataz aktiviteleri daha yüksek gözlemlenmiştir. Bu durum mikrobiyal aktivitenin ve organik maddenin dönüşüm etkinliğinin arttığını göstermektedir. Evsel atık bazlı vermikompostlar, hem kaya fosfatı katkılı hem de katkısız halde, solucan popülasyon artışı ve biyolojik aktivite açısından en iyi sonuçları vermiştir. Genel olarak, olgunluk ve stabilite göstergelerinin tek bir parametre ile

değerlendirilemeyeceği, kompostun kalitesinin kullanılan hammaddeye ve katkı maddesine bağlı olarak değişkenlik gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Rathore ve arkadaşları (2023), Himachal Pradesh'te iki yetiştirme sezonu boyunca yürüttükleri tarla denemesinde, fermente sıvı organik besin formülasyonlarının [bölge çiftçilerinin farklı organik karışımlarla hazırladığı, jeevamrut (inek dışkısı, şeker kamışı pekmezi vb.) ve panchagavya inek sütü, yoğurdu, dışkısı vb.]] ve organik gübrelerin (vermicompost ve tavuk gübresi) patlıcan (*Solanum melongena* L.) verimi ile toprak verimliliği ve mikrobiyal aktivite üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. On farklı uygulamanın karşılaştırıldığı çalışmada, özellikle T4 (90% RDN + 5% panchagavya + 5% jeevamrut) uygulaması öne çıkmıştır. T4 uygulaması altında, toprakta en yüksek dehidrogenaz ( $4.9 \text{ mg TPF g}^{-1} \text{ saat}^{-1}$ ), fosfataz ( $25.5 \text{ } \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ saat}^{-1}$ ) ve üreaz ( $0.27 \text{ } \mu\text{g NH}_4^+ \text{ g}^{-1} \text{ saat}^{-1}$ ) aktiviteleri kaydedilmiştir. Ayrıca, mikrobiyal popülasyon ( $203.3 \times 10^8 \text{ cfu/g}$  bakteri;  $4.34 \times 10^3 \text{ cfu/g}$  mantar;  $3.41 \times 10^2 \text{ cfu/g}$  aktinomiset) ve mikrobiyal biyokütle karbonu ( $66.1 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ ) bakımından da bu uygulama üstünlük göstermiştir. Patlıcan verimi de T4 uygulamasında en yüksek değerlerine ulaşmış ( $389.2 \text{ q ha}^{-1} - 2017$ ;  $153.7 \text{ q ha}^{-1} - 2018$ ) ve bu sonuç, topraktaki makro ve mikro besin madde düzeylerindeki artışla da desteklenmiştir. Çalışma sonunda, fermente sıvı organik besin formülasyonların ve organik gübrelerin birlikte uygulanmasının, toprak sağlığını, mikrobiyal canlılığı ve ürün verimini artırmak için etkili bir strateji olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, panchagavya ve jeevamrut gibi geleneksel fermente sıvı organik girdilerin, sürdürülebilir sebze üretim sistemleri için güçlü bir alternatif sunduğu belirtilmiştir.

Sainova ve arkadaşları (2023), Güney Kazakistan'ın Türkistan bölgesine özgü sierozem topraklarının kurşun (Pb) kirliliğine karşı enzim aktivitelerini inceleyerek, vermicompost uygulamasının bu etkiler üzerindeki düzenleyici rolünü araştırmışlardır. Araştırmanın temel amacı, kurşun kontaminasyonunun neden olduğu toprak biyolojik bozulmasını biyokimyasal göstergeler üzerinden değerlendirmek ve vermikompostun bu bozunma üzerindeki düzeltici potansiyelini ortaya koymaktır. Denemeler, 0 (kontrol), 16, 80 ve  $160 \text{ mg Pb kg}^{-1}$  seviyelerinde yapay kurşun kirliliği uygulanmış topraklar üzerinde, vermicompost uygulamalı ve uygulamasız olarak iki set hâlinde gerçekleştirilmiştir. Toprakta izlenen biyolojik göstergeler arasında dört temel enzim aktivitesi yer almıştır: katalaz, dehidrogenaz, üreaz ve proteaz. Arazi örnekleri Türkistan bölgesindeki Tarım arazilerinden, kontrol örnekleri ise Karatau doğa rezervinden alınmıştır. Kurşun artışının,

katalaz, dehidrogenaz ve proteaz aktivitelerinde anlamlı azalışlara yol açmıştır. Özellikle dehidrogenaz aktivitesi, 160 mg Pb kg<sup>-1</sup> seviyesinde kontrol grubuna kıyasla %93'e kadar düşmüş; bu durum, kurşunun toprak mikroorganizmaları üzerindeki yüksek toksisitesini ve gaz değişim süreçlerinin ciddi biçimde baskılandığını göstermektedir. Üreaz aktivitesi ise Pb düzeyiyle birlikte artan tek enzim olmuştur. Bu, kurşunun ortamda çözünmeyen Pb bileşikleri (hidroksit, karbonat vs.) oluşturmamasını teşvik ederek pH'ı alkalileştirmesi ve üreazı inhibe edici etkiyi baskılaması ile açıklanmıştır. Vermicompost uygulaması, her bir Pb seviyesinde tüm enzimlerin aktivitesini anlamlı düzeyde artırmıştır. Bu artış, vermicompostun toprak mikrobiyal canlılığını ve humus içeriğini zenginleştirmesiyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca vermicompost, Pb'nin bitkilere taşınabilirliğini düşürmüş ve bu da çevresel güvenliğin artırılmasına katkı sağlamıştır. Yonca bitkisi ile yapılan ek denemelerde, özellikle 3. biçim döneminde katalaz aktivitesinde keskin bir artış gözlenmiştir. Bu artış, kök sisteminin toprağı gevşeterek mikrobiyal aktiviteyi artırması ve simbiyotik azot fiksasyonu yoluyla mikroflora gelişimini desteklemesi ile açıklanmıştır. Çalışma vermicompostun, kurşunla kontamine olmuş sierozem topraklarda mikrobiyal ve enzimatik faaliyetleri canlandırarak toprak biyolojik sağlığını iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Dehidrogenaz ve proteaz aktivitelerinin ağır metal kirliliğinin biyogöstergesi olarak kullanılabileceği; katalaz aktivitesinin ise hem kontaminasyon hem de vermicompost uygulamasının etkilerini hassas biçimde yansıttığı önerilmektedir.

Toor ve arkadaşları (2023), Türkiye'nin Samsun ili ekolojik koşullarında gerçekleştirdikleri bu çalışmada, farklı oranlarda uygulanan solucan gübresinin (vermicompost), marul (*Lactuca sativa* L.) bitkisinin rizosfer bölgesindeki mikrobiyolojik özellikler üzerine etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda, %0, %1, %2 ve %4 dozlarında vermicompost uygulamaları ile bitkili (P1) ve bitkisiz (P0) olmak üzere iki farklı saksı tipi kullanılmış ve deneme tamamen rastgele parseller deneme desenine göre kurulmuştur. Batavia tipi marul bitkisi, çevresel streslere karşı duyarlılığı nedeniyle model bitki olarak tercih edilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, vermicompost uygulamaları, toprak pH'sında hafif artışa neden olmuş; özellikle %1 ve %4 dozlarında pH değerleri sırasıyla 7.21 ve 7.01'e yükselmiştir. Elektriksel iletkenlik (EC) değerleri ise uygulama dozu arttıkça anlamlı düzeyde artmış, en yüksek değer %4 dozunda (2213.33 µS/cm) elde edilmiştir. Organik madde oranı, hem bitkili hem de bitkisiz

saksılarda vermikompost dozu ile doğru orantılı olarak artış göstermiştir (%2.07–%3.97). Biyolojik parametreler açısından değerlendirildiğinde; mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC), dehidrogenaz aktivitesi (DHA), katalaz aktivitesi (CA) ve bazal solunum hızı (BSR) gibi mikrobiyolojik göstergelerde de vermikompost uygulamalarının pozitif etkileri tespit edilmiştir. Özellikle %2 doz uygulamasında DHA aktivitesi (88.01 µg TPF/g/h) ile mikrobiyal metabolik aktivite anlamlı düzeyde artmıştır. Bitki büyüme parametreleri incelendiğinde ise, en yüksek taze ağırlık ve boy değerlerinin %2'lik vermikompost dozu ile elde edildiği, fotosentetik pigmentlerden klorofil a, b ve toplam klorofil içeriklerinin ise özellikle %1 ve %2 uygulamalarıyla anlamlı şekilde arttığı görülmüştür. Bu durum, vermikompostun hem doğrudan besin elementi sağlama kapasitesi hem de mikrobiyal aktiviteyi destekleyici etkisiyle ilişkili bulunmuştur. Aynı zamanda vermikompostun içerdiği yararlı mikroorganizmaların (ör. azot fikseden bakteriler, fosfat çözücüler) rizosfer mikrobiyotasını zenginleştirdiği ve bitki besin maddesi alımını iyileştirdiği vurgulanmıştır. Elde edilen bulgular, vermikompostun hem toprak sağlığını iyileştirme hem de marul bitkisinin büyüme ve gelişimini teşvik etme potansiyelini ortaya koymakta; özellikle %1–2 doz aralığının optimum uygulama seviyesi olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, çevre dostu organik gübrelerin sürdürülebilir tarım uygulamalarında kimyasal gübrelerin yerine geçebilecek etkili alternatifler olabileceğini desteklemektedir.

Wu ve arkadaşları (2023), Çin'in Jiangsu bölgesindeki serada yürüttükleri bu çalışmada, farklı oranlarda uygulanan biochar ve solucan gübresinin (vermicompost) toprak mikrobiyal toplulukları ve enzimatik aktiviteler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada domates (*Solanum lycopersicum* L.) bitkisi yetiştirilmiş ve altı farklı uygulama grubu oluşturulmuştur: %1, %3 ve %5 oranlarında biochar (BC1, BC3, BC5); %3 ve %5 oranlarında vermikompost (VC3, VC5) ve kontrol grubu (CK). Araştırmanın temel amacı, bu organik katkı maddelerinin sera toprağının fizikokimyasal özellikleri, mikrobiyal çeşitliliği ve enzim aktiviteleri ile olan ilişkisini değerlendirmek olmuştur. Denemeler sonucunda, her iki organik uygulamanın da toprak pH'ını, organik madde içeriğini ve çözünmüş organik karbon (DOC) konsantrasyonunu anlamlı şekilde artırdığı görülmüştür. Özellikle BC3 uygulamasıyla pH 1.66 birim, organik madde %54.6 ve DOC %43.9 oranında artış göstermiştir. Mikrobiyal çeşitlilik açısından BC3, bakteriyel topluluklarda en yüksek ACE, Chao1, Simpson ve Shannon indeks değerlerini

sağlamıştır. Funguslarda ise biochar uygulamaları Ascomycota'nın göreceli olarak miktarını artırırken, Anthophyta'nın miktarını azaltmıştır. Ayrıca, %3 ve %5 biochar uygulamaları Actinobacteria ve Acidobacteria gibi faydalı mikrobiyal grupların miktarını artırmıştır. Enzim aktiviteleri incelendiğinde, VC5 uygulaması üreaz aktivitesini %222.76 oranında artırarak en yüksek etkiyi göstermiştir. BC3 ise %68.6 oranında artış ile alkalın fosfataz üzerinde en olumlu etkiyi sağlamış; aynı zamanda nitrat redüktaz aktivitesini %39.23 oranında azaltarak azot döngüsünü yavaşlatmıştır. Korelasyon analizlerine göre, Acidobacteria miktarı ile alkalın fosfataz aktivitesi arasında güçlü pozitif ( $p < 0.01$ ), nitrat redüktaz aktivitesiyle ise negatif ilişki ( $p < 0.05$ ) tespit edilmiştir. DOC konsantrasyonu ve toprak pH'ı da mikrobiyal çeşitlilikle anlamlı ilişki göstermiştir. Toor ve arkadaşları (2024), Türkiye'nin Samsun ilinde yürüttükleri bu kontrollü sera çalışmasında, farklı vermikompost (VC) dozlarının toprak verimliliği ile marul (*Lactuca sativa* L. cv. 'Dragone') bitkisinin morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Denemede, %0 (V0), %1 (V1), %2 (V2) ve %4 (V3) oranlarında uygulanan vermikompost dozlarının, hem bitki büyümesi hem de toprak mikrobiyal dinamikleri üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Araştırma sonucunda, en yüksek verim artışı (%56.43) V2 (%2 VC) dozunda elde edilmiş olup, bu doz ayrıca toprak enzim aktiviteleri ve biyokimyasal parametreler açısından da en verimli düzey olarak belirlenmiştir. V1 ve V3 uygulamaları da olumlu etkiler göstermiş olmakla birlikte, aşırı VC uygulaması (V3), tuzluluk seviyesinin artmasına ( $EC = 2213 \mu S/cm$ ) neden olarak, potansiyel bir sınırlayıcı faktör olarak değerlendirilmiştir. Toprakta organik madde, toplam azot, alınabilir fosfor, potasyum, magnezyum ve çinko içerikleri vermikompost dozuyla birlikte artış göstermiş; özellikle V3 uygulamasıyla toprakta P içeriği 164 mg/kg'a ulaşmıştır (kontrol: 36.5 mg/kg). Enzimatik aktivitelere bakıldığında, fosfataz ve üreaz aktiviteleri özellikle V2 ve V3 uygulamalarında anlamlı artış göstermiştir. Fosfataz aktivitesi V3'te  $1570 \mu g \text{ PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  düzeyine çıkarak kontrol grubuna göre %53 artış göstermiştir. Toprak biyolojik özelliklerinden mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC) ve dehidrogenaz aktivitesi (DHA) V3 uygulamasında sırasıyla %90.4 ve %20.3 artarken, bazal toprak solunumu (BSR) ise VC uygulamalarıyla azalmıştır. Bu durum, mikrobiyal topluluk yapısının daha verimli solunum stratejilerine yöneldiğini göstermektedir. Aynı şekilde, katalaz aktivitesi de VC uygulamalarıyla artış göstermiştir. Bitki biyokimyasal parametrelerinde, karotenoid içerikleri V2

uygulamasında %164.28 oranında artarken, toplam klorofil içeriği V1 uygulamasında %46'ya kadar yükselmiştir. Pearson korelasyon ve temel bileşenler analizleri, bitki verimi ile toprak enzimatik aktivitesi, mikrobiyal biyokütle ve yaprak pigmentleri arasında yüksek düzeyde pozitif ilişkiler olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bazal solunum oranı gibi bazı mikrobiyal göstergeler ile verim arasında negatif korelasyonlar da saptanmıştır. Çalışma, vermikompostun optimum dozda (%2) uygulanmasının, hem toprak sağlığını hem de ürün verimini artırdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca aşırı VC uygulamasının (V3) EC ve bazı mikronutrient dinamikleri açısından dikkatle yönetilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Sonuçlar, vermikompostun mikrobiyal biyolojik süreçleri, enzimatik aktiviteleri ve bitki beslenmesini teşvik ederek sürdürülebilir tarım sistemlerinde önemli bir organik girdi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Lv ve arkadaşları (2020), Çin'in Guangzhou bölgesinde gerçekleştirdikleri bu sera denemesinde, tıbbi bitki artıklarından elde edilen vermikompostun (herb residue vermicompost, HRV), toprak mikrobiyal aktiviteleri üzerindeki etkilerini kimyasal gübre (NPK) ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Mısır (*Zea mays*) bitkisi ile yürütülen saksı denemesinde, dört farklı dozda HRV (25, 50, 75, 100 g/kg toprak) ile eşdeğer azot, fosfor ve potasyum içeren dört farklı kimyasal gübre dozu ve bir kontrol (CK) uygulanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, HRV uygulamaları mikrobiyal biyokütle karbon (MBC), toprak solunumu ve enzimatik aktiviteler (özellikle üreaz, invertaz ve alkalın fosfataz) açısından kimyasal gübreden belirgin biçimde üstün bulunmuştur. Özellikle 75 ve 100 g/kg dozlarında HRV uygulaması, mikrobiyal solunumda ve MBC'de önemli artışlar sağlamış; bu dozlarda mikrobiyal aktivite 3 ila 14 kat artmıştır. Ayrıca, HRV uygulaması ile invertaz aktivitesinde %473'e kadar, üreaz aktivitesinde %923'e kadar artış gözlemlenmiştir. Toprak fosfataz aktivitelerinde ise asidik fosfataz yalnızca en düşük HRV dozunda azalmış; buna karşın alkalın fosfataz aktivitesi tüm HRV dozlarında hem kontrol hem de kimyasal gübreye göre anlamlı artış göstermiştir. PCA analizi ve korelasyon sonuçları, HRV uygulamalarının toprak mikrobiyal işlevselliğini özellikle C/N dengesi, solunum ve enzimatik aktiviteler düzeyinde artırdığını göstermiştir. HRV'nin düşük dozlarda bile toprak mikrobiyal aktivitesini iyileştirebildiğini, ancak en verimli sonuçların 75–100 g/kg dozlarında alındığını belirtmişlerdir. Buna karşılık, kimyasal gübre uygulamalarında yüksek dozların bazı mikrobiyal aktiviteleri baskıladığı görülmüştür. Bu sonuçlar, bitkisel atıklardan elde

edilen HRV'nin toprak biyolojik kalitesini artırmada ve kimyasal gübreye sürdürülebilir bir alternatif sunmada önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

Ahır gübresi ise hem besin elementleri kaynağı hem de toprak yapısını iyileştiren organik madde katkısı sağlar (Edmeades, 2003).

Braos ve ark (2014), toprağa ahır gübresi uyguladıktan sonra 9 farklı zamanda (3, 7, 14, 21, 28, 49, 70, 91 ve 112. Gün) örnekleme yaparak topraktaki fosforu incelemişler ve araştırma sonucuna göre PO miktarının ve buna bağlı olarak bitkilerin alabileceği formda Pİ miktarının arttığını belirlemişlerdir.

Biswal ve arkadaşları (2023), Hindistan'ın Kuzeydoğu Himalaya Bölgesi'nde asidik topraklarda yetiştirilen çeltik üzerinde yürüttükleri bu arazi çalışmasında, farklı organik gübre kaynakları ile kireç uygulamasının toprak verimliliği ve mikrobiyal enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Denemede, 6 farklı besin kaynağı [Kontrol, %100 inorganik gübre, %100 ahır gübresi (FYM), FYM + solucan gübresi (VC), FYM + tavuk gübresi (PM), FYM + domuz gübresi (SM)] ile bu uygulamaların her birinin kireçle (400 kg/ha) kombinasyonu olmak üzere toplam 12 uygulama değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek bitki besin elementi (N, P, K, Fe, Zn) mevcudiyeti, %50 FYM + %50 domuz gübresi (SM) uygulamasında elde edilmiştir. Özellikle azot mevcudiyeti bu uygulamada %11.7 daha yüksek bulunmuştur. Enzimatik aktiviteler bakımından da benzer şekilde en yüksek değerler SM uygulamasında kaydedilmiştir: dehidrogenaz %78.6, fluorescein diasetat (FDA) %47, ve mikrobiyal biyokütle karbonu (SMBC) %44.5 oranında artış göstermiştir. Ureaz aktivitesi ise en yüksek %100 inorganik gübre uygulamasında gözlenmiştir. Kireç uygulaması toprak pH'ında küçük artışlar sağlasa da, mikrobiyal enzim aktiviteleri üzerinde anlamlı bir etki yaratmamıştır. Asidik koşullarda enzim aktivitelerinin ve mikrobiyal biyokütlenin artışı, özellikle domuz gübresi gibi yüksek besin içeriğine sahip organik materyallerin kullanımıyla ilişkili bulunmuştur. Özellikle FDA ve dehidrogenaz aktivitelerinin çiçeklenme döneminde hasat dönemine göre daha yüksek olması, bu enzimlerin mikrobiyal solunum ve aktif karbon kullanımını yansıttığını göstermektedir. Bu bulgular, FYM ile birlikte domuz ya da tavuk gübresi kullanımının, kuzeydoğu Hindistan'daki asidik topraklarda hem verim hem de toprak sağlığını iyileştirmek açısından etkili bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır.

Dvorackova ve Dvoracek (2023), Çekya'nın Bohemya-Moravya yaylalarında yürüttükleri uzun süreli tarla denemelerinde, ahır gübresi uygulamasının ardından uygulanan farklı dozlarda biocharın toprak özellikleri ve bitki verimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, 30 t/ha ahır gübresi sabit tutulmuş, üzerine sırasıyla 0, 15, 30 ve 45 t/ha biochar uygulanmıştır. Dört yıl süresince yapılan izlemelerde, özellikle kolza (*Brassica napus*) tohum verimi ve bazı toprak parametreleri değerlendirilmiştir. Ilıman iklim koşullarında kumlu killi tınlı topraklarda gerçekleştirilen bu deneylerde, biochar uygulamasının toprak pH'sını ve kümülatif toprak solunumu gibi mikrobiyal parametreleri anlamlı şekilde etkilediği, fakat dehidrogenaz enzim aktivitesinin (DHA) biochar dozu arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, DHA aktivitesi 1.93 g TPF/g/h'den (kontrol) 1.49 g TPF/g/h'ye (45 t/ha biochar) düşmüştür. Benzer şekilde, kümülatif solunum da artan biochar dozlarında azalma göstermiştir. Buna karşın, biochar 30 t/ha dozuna kadar tohum verimini artırmış; 45 t/ha dozunda ise verim azalmıştır. Toprakta biochar uygulamaları ile COX (oksitlenebilir karbon) ve tamponlama kapasitesinde hafif artışlar gözlenmiş, ancak istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Buna rağmen, pH değerlerinde anlamlı artışlar meydana gelmiştir ( $p < 0.001$ ). Araziye 2016 yılında uygulanan biocharın 4.5 yıl sonra hâlâ etkili olduğu, ancak en yüksek dozun (45 t/ha) toprak mikroorganizmaları üzerindeki olumsuz etkiler gösterdiği belirtilmiştir. Biocharın ahır gübresi ile birlikte uygulanmasının organik madde mineralizasyonunu yavaşlattığını, buna karşın besin maddelerinin salımını uzun vadede desteklediğini vurgulamışlardır. Ayrıca, biocharın yüksek piroliz sıcaklığında (500 °C) üretilmiş olmasının, DHA üzerindeki baskılayıcı etkiyle ilişkili olabileceği belirtilmiştir. Biocharın uzun vadede tarımsal topraklarda dikkatli doz yönetimiyle sürdürülebilir bir katkı sağlayabileceği önerilmektedir.

Kumar ve arkadaşları (2023), Hindistan'ın Haryana bölgesinde yer alan alkalın karakterli topraklarda, farklı organik gübre türlerinin ve uygulama seviyelerinin, gül bitkisi yetiştiriciliği altındaki toprak besin durumu ve mikrobiyal aktivite üzerine etkilerini incelemek amacıyla bir yıl süreli tarla denemesi gerçekleştirmişlerdir. Deneme, ahır gübresi (FYM), vermikompost ve tavuk gübresi (PM) olmak üzere üç organik gübre ve bunların 0, 4, 5 ve 6 kg/m<sup>2</sup> dozlarının kombinasyonlarını içeren 12 uygulamayı kapsamış ve bölünmüş parseller deneme deseninde üç tekerrürlü olarak yürütülmüştür. Deneme sonucunda, toprakta en yüksek organik karbon içeriği (%0.98) vermikompostun 6 kg/m<sup>2</sup>

düzeyinde uygulanmasıyla elde edilmiştir. Mikrobiyal aktivitenin biyokimyasal göstergeleri olan dehidrogenaz ve alkalın fosfataz aktiviteleri ise sırasıyla FYM (66.33  $\mu\text{g TPF/g/gün}$ ) ve PM (171.20  $\mu\text{g PNP/g/saat}$ ) uygulamalarında en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, her bir organik materyalin mikrobiyal faaliyetleri farklı yönlerden etkileyerek toprak biyolojik kalitesine özgün katkılar sunduğunu göstermektedir. Bitki besin elementi içeriği bakımından, gül yapraklarında en yüksek azot (%2.35) ve fosfor (%0.29) konsantrasyonları tavuk gübresi 6  $\text{kg/m}^2$  uygulamasında; potasyum (%1.47) içeriği ise vermikompostun aynı dozunda elde edilmiştir. Benzer eğilimler toprakta alınabilir besin maddeleri açısından da gözlenmiştir; PM uygulaması, toprakta azot (189.00  $\text{kg/ha}$ ) ve fosfor (31.40  $\text{kg/ha}$ ) birikimini en fazla artıran uygulama olmuş, vermikompost ise potasyum düzeyini maksimuma çıkarmıştır (425.50  $\text{kg/ha}$ ). Araştırmanın genel bulguları, organik gübrelerin özellikle mikrobiyal enzim aktiviteleri, toprak karbon içeriği ve besin elementlerinin bitki tarafından alınımı olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Tavuk gübresi, kolay parçalanabilir yapısı ve yüksek besin içeriği sayesinde fosfataz aktivitesini ve P birikimini teşvik ederken; vermikompost, potasyum çözünürlüğünü artırıcı etkisiyle öne çıkmıştır. FYM ise genel mikrobiyal solunumu (dehidrogenaz) desteklemiş ve mikrobiyal canlılık açısından olumlu etki göstermiştir.

Kumar ve arkadaşları (2023), Hindistan'ın Uttar Pradesh eyaletinde yürüttükleri tarla denemesinde, kademeli gübre dozları ve çinko uygulama yöntemlerinin ahır gübresi (FYM) ile birlikte ve ayrı uygulanmasının, çeltik yetiştirilen toprakların fizikokimyasal ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Deneme, tesadüf blokları deneme deseninde 10 farklı uygulamayla kurulmuştur. Elde edilen bulgulara göre, %75 RDF (önerilen gübre dozu) + %25 FYM-N + 25  $\text{kg ZnSO}_4 \text{ ha}^{-1}$  toprak uygulaması, toprakta önemli ölçüde organik karbon, alınabilir azot, fosfor, potasyum ve çinko içeriğini artırmış; ayrıca mikrobiyal biyokütle karbonu (177.3  $\mu\text{g MBC g}^{-1}$  toprak), dehidrogenaz enzimi aktivitesi (136.9  $\mu\text{g TPF g}^{-1}$  toprak  $\text{gün}^{-1}$ ) ve toplam mikrobiyal popülasyon (bakteri, mantar, aktinomiset) açısından da en yüksek değerleri sağlamıştır. Bu uygulama aynı zamanda pH ve elektriksel iletkenlikte (EC) azalma, toprakta ise hacim ağırlığında düşüş sağlamıştır. Organik madde ilavesiyle birlikte yapılan çinko ve azot uygulamalarının, toprak mikrobiyal aktivitesini uyararak toprak biyolojik verimliliğini artırdığı ortaya konmuştur. Bu sonuçlar, sürdürülebilir pirinç üretiminde entegre besin

yönetimi stratejilerinin, hem toprak verimliliğini hem de mikrobiyal sağlığı destekleyerek uzun vadeli üretkenlik için kritik olduğunu göstermektedir.

Gawde ve arkadaşları (2023), Hindistan'ın Raipur bölgesindeki Vertisol topraklarında yürütülen uzun dönemli gübre denemesinde, pirinç-buğday münavebe sistemi altında toprak dehidrogenaz enzim aktivitesinin farklı gübreleme rejimlerine nasıl tepki verdiğini incelemişlerdir. Çalışmada, kimyasal gübre uygulamaları ile organik gübre uygulamaları karşılaştırılmış ve toplam 10 farklı uygulama (kontrol, %50–150 NPK, NPK+ahır gübresi, NPK+çinko, NPK+yeşil gübre vb.) üç tekerrürlü tesadüf blok deneme deseninde düzenlenmiştir. İki yıllık denemede pirinç ve buğday dönemlerinde alınan örneklerde dehidrogenaz enzimi aktivitesi, özellikle %100 NPK + ahır gübresi (FYM) uygulamasında en yüksek düzeyde ölçülmüştür. Bu uygulama, tüm örneklem dönemlerinde (30, 60, 90 gün ve hasat) istatistiksel olarak anlamlı şekilde daha yüksek enzim aktivitesi sağlamış. En düşük dehidrogenaz aktivitesi ise kontrol parsellerinde gözlemlenmiştir.

Nichitha ve arkadaşları (2023), Hindistan'ın Karnataka eyaletinin Hilly Zone bölgesinde, zencefil (*Zingiber officinale*) üretim sistemlerinde çiftçilerin uyguladığı farklı düzeylerdeki organik gübre kullanımının toprak karbon stokları (SCS) ve toprak enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma, Shivamogga bölgesinde 60 zencefil üreticisiyle yapılan anket ve arazi gözlemlerine dayalı olarak yürütülmüştür. Çiftçiler, uyguladıkları organik gübre ve kimyasal gübre miktarlarına göre K-means kümeleme analizine tabi tutularak üç kategoriye ayrılmıştır; Kategori 1 (Düşük organik gübre + yüksek kimyasal gübre), Kategori 2 (Düşük organik gübre + çok yüksek kimyasal gübre), Kategori 3 (Yüksek organik gübre + orta düzeyde kimyasal gübre). Toprak örnekleri hasattan sonra 0–15 cm ve 15–30 cm derinliklerden alınmış, organik karbon (SOC) içerikleri ve toprak biyolojik kalitesini temsil eden üç önemli enzim aktivitesi (dehidrogenaz, asidik fosfataz ve üreaz) ölçülmüştür. Sonuçlara göre, en yüksek SOC ve SCS değerleri, Kategori 3 çiftçilerinin yüksek miktarda organik gübre uyguladığı alanlarda tespit edilmiştir. Bu grupta yüzey ve alt toprakta SOC sırasıyla %1.14 ve %1.06; toplam SCS ise 62.2 t ha<sup>-1</sup> olarak ölçülmüştür. Buna karşın, Kategori 1 ve 2 çiftçilerinde SCS değerleri sırasıyla 37.75 ve 39.09 t ha<sup>-1</sup> düzeyinde kalmıştır. SOC ile organik gübre uygulamaları arasında güçlü pozitif korelasyon belirlenmiştir ( $r = 0.914^{**}$ ). Toprak biyolojik aktivitesi açısından da benzer bir eğilim gözlenmiştir. En yüksek dehidrogenaz

aktivitesi ( $54.49 \mu\text{g TPF g}^{-1} \text{g}^{-1} \text{g}^{-1}$ ), asidik fosfataz ( $6.20 \mu\text{g pNP g}^{-1} \text{saat}^{-1}$ ) ve üreaz ( $11.62 \mu\text{g NH}_4^+-\text{N g}^{-1} \text{saat}^{-1}$ ) aktiviteleri yine Kategori 3'te kaydedilmiştir. Enzim aktiviteleri ile organik gübre uygulamaları arasında anlamlı pozitif korelasyonlar saptanmıştır ( $r = 0.577-0.830^{**}$  aralığında).

Tiwari ve arkadaşları (2023), Hindistan'ın Madhya Pradesh eyaletinde yer alan bir Vertisol toprakta, 46 yıl boyunca gübreleme ve ahır gübresi (FYM) uygulamalarının toprak kimyasal, biyolojik özellikleri ve soya fasulyesi (*Glycine max* L.) verimi üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Araştırma, 1972 yılında başlatılan ve soya fasulyesi-buğday (*Triticum aestivum* L.) münavebe sistemi altında sürdürülen Hindistan Merkezli uzun süreli gübre denemeleri (LTFE) kapsamında yürütülmüştür. Sekiz farklı gübreleme stratejisinin yer aldığı bu çalışmada; %50, %100 ve %150 NPK, yalnızca N veya NP uygulamaları, kükürtsüz NPK (-S), NPK ve 5 ton/ha FYM ile desteklenen %100 NPK kombinasyonları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, %100 NPK + FYM uygulamasının, toprak organik karbon (OC) içeriğini %82.6 oranında artırarak ( $8.62 \text{ g kg}^{-1}$ ) başlangıç ( $5.7 \text{ g kg}^{-1}$ ) ve kontrol ( $4.72 \text{ g kg}^{-1}$ ) değerlerine kıyasla en yüksek seviyeye ulaştırdığını göstermiştir. Aynı uygulama, mikrobiyal biyokütle karbonu (SMBC:  $340 \mu\text{g C g}^{-1}$ ) ve azotu (SMBN:  $42.2 \mu\text{g N g}^{-1}$ ) da önemli ölçüde artırmıştır. En yüksek mikrobiyal C:N oranı ise dengesiz gübreleme yapılan %100 N ve %100 NPK(-S) uygulamalarında gözlenmiştir. Enzimatik aktiviteler açısından değerlendirildiğinde; dehidrogenaz (DHA), asidik ve alkalın fosfatazlar ile  $\beta$ -glukosidaz aktiviteleri, %100 NPK + FYM uygulamasında istatistiksel olarak anlamlı düzeyde yüksek bulunmuştur. Bitkisel üretkenlik yönünden bakıldığında, %100 NPK + FYM uygulaması, soya fasulyesinde ortalama  $2191 \text{ kg ha}^{-1}$  tane verimi ve  $3553 \text{ kg ha}^{-1}$  sap verimi ile en yüksek çıktıyı sağlamıştır. Bu değerler, kontrol grubuna göre sırasıyla %164.3 ve %82.2 oranında artış anlamına gelmektedir. Bu sonuçlar, dengeli ve entegre besleme yaklaşımlarının, özellikle FYM'nin düzenli olarak uygulanmasının, toprak biyolojik sağlığını artırarak uzun vadede ürün verimliliğini sürdürülebilir şekilde yükselttiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, toprak mikrobiyal parametreleri ve enzimatik aktivitelerin, toprak verimliliği izlemede hassas biyolojik göstergeler olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Nayak ve Mishra (2024), demir madeni atık toprağının mikrobiyal ve bitkisel gelişime uygun hale getirilmesi amacıyla organik ve biyogübre uygulamalarının etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, ahır gübresi (FYM), tavuk gübresi (PM), vermikompost (VC)

ve *Rhizobium* biyogübresi (BF) kombinasyonları kullanılarak üç yerel bitki türü (senna tora, jak meyvesi, antep fıstığı) 180 gün boyunca izlenmiştir. Sonuçlar, özellikle T2 (PM+BF) uygulamasının toprak pH'ını, elektriksel iletkenliğini, organik karbon ve makro besin elementlerini (N, P, K) anlamlı şekilde artırdığını göstermiştir. Bakteri popülasyonu en yüksek T2'de kaydedilirken, mantar popülasyonu tüm uygulamalarda azalmıştır. Ekzoenzim aktiviteleri (invertaz, amilaz, selüloz, proteaz, dehidrogenaz) özellikle organik uygulamalarla birlikte önemli artış göstermiştir. Bitkisel büyüme parametreleri incelendiğinde, T2 uygulamasında biyokütle, gövde uzunluğu, yaprak alan indeksi ve toplam klorofil içeriği en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu bulgular, PM ve BF kombinasyonunun hem mikrobiyal faaliyetleri hem de bitki gelişimini optimize ettiğini göstermektedir.

Yağanoğlu ve Aydın (2024), bu çalışmada, farklı tekstür sınıflarına sahip topraklara uygulanan organik (ahır gübresi) ve kimyasal (20:20:0 N:P:K) gübrelerin, toprak enzim aktiviteleri ve bazı kimyasal özellikler üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Erzurum ovasından alınan kumlu, tınlı ve killi tekstürdeki toprak örnekleri, sera koşullarında fasulye (*Phaseolus vulgaris* L.), mısır (*Zea mays* L.) ve kontrol (bitkisiz) koşullarda incelenmiş, her toprak tipi için organik gübre, kimyasal gübre ve kontrol olmak üzere üç farklı uygulama yapılmıştır.

Denemelerde toprakların pH, EC, organik madde (OM), toplam azot (N), alınabilir fosfor ( $P_2O_5$ ), değişebilir katyonlar ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ), mikroelement içerikleri (Fe, Cu, Zn, Mn) ve katyon değişim kapasitesi (KDK) analiz edilmiştir. Ayrıca, dört temel enzim olan üreaz, asit fosfataz, alkali fosfataz ve dehidrogenaz aktiviteleri değerlendirilmiştir. Araştırmacılar çalışma sonucunda; organik ve kimyasal gübre uygulamalarının toprakların organik madde içeriğini, besin elementi seviyelerini ve enzim aktivitelerini önemli ölçüde artırmıştır. Organik gübre uygulamaları, özellikle üreaz ve dehidrogenaz aktivitesinde kimyasal gübreye kıyasla daha yüksek artış sağladığını, üreaz aktivitesinin kumlu toprakta %40, killi toprakta %35 ve tınlı toprakta %28 oranında arttığını ve en yüksek enzim aktivitesinin killi toprak + ahır gübresi uygulamasında elde edildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar; asit fosfataz ve alkali fosfataz aktivitelerinde, organik gübre uygulamaları tüm toprak tiplerinde kimyasal gübreye göre daha belirgin artış gösterdiğini, özellikle alkali fosfatazın, killi toprakta %10-15 artışla öne çıktığını, dehidrogenaz aktivitesinin, toprak mikrobiyal canlılığının bir göstergesi olarak, tüm

topraklarda önemli düzeyde arttığını ve bu artışın en fazla organik gübre uygulanan kumlu toprakta (%55) olduğunu tespit etmişlerdir. Bunlara ek olarak, organik gübre uygulamalarının, toprakta pH'ı hafif düşürdüğünü; EC ve alınabilir P düzeyini arttırdığını, KDK ve değişebilir Ca, Mg, K içeriklerinin de organik gübreyle yükseldiğini bildirmişlerdir.

Campdelacreu Rocabruna ve arkadaşları (2024), Kuzeydoğu İtalya Alpleri'nde yer alan çayır alanlarında gerçekleştirdikleri uzun süreli arazi çalışmasında, farklı organik gübre türlerinin (sığır gübresi, sıvı hayvan atığı ve bunların kombinasyonu) ve değişen azot (N) girdilerinin toprak fosfataz enzim aktiviteleri (asidik ve alkalın), fosfor (P) kullanılabilirliği ve yem verimi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneme, üç farklı lokasyonda iki ayrı vejetasyon sınıfına (C1: orta düzeyde tür fakiri, C2: orta düzeyde tür zengini) sahip çayır alanlarında bölünmüş parsel deneme deseniyle yürütülmüş; beş yıllık uygulama döneminin ardından ölçümler gerçekleştirilmiştir. Araştırmada elde edilen bulgulara göre, N girdisi ve gübre türünün birlikte değerlendirilmesi, özellikle asidik fosfataz (ACP) aktivitesi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmuştur. ACP aktivitesi, özellikle ahır gübresi ile birlikte sıvı atıkların kullanıldığı kombinasyon uygulamalarında N girdisi arttıkça anlamlı şekilde azalmıştır. Öte yandan, alkalın fosfataz (ALP) aktivitesinin ne gübre türü ne de N girdisinden etkilendiği; ancak toprak organik karbon içeriği ve bitki çeşitliliğini yansıtan Shannon indeksi ile pozitif ilişki gösterdiği belirlenmiştir. ACP aktivitesi toprak pH'sı ile negatif, ALP ise pozitif korelasyon göstermiştir. Her iki enzim aktivitesi de toprak nemi ile negatif yönde ilişkilidir. Toprakta kullanılabilir P miktarı; artan N girişi, özellikle ahır gübresi ile, artan pH, organik karbon, K<sub>2</sub>O içeriği ve ALP aktivitesi ile pozitif ilişki göstermiştir. Bununla birlikte, yem verimini belirleyen en önemli faktörün uygulanan N miktarı olduğu; ne enzim aktiviteleri ne de toprakta mevcut P düzeyinin verim üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle yıllık toplam yem verimi, daha düşük tür çeşitliliğine sahip C1 sınıfındaki çayırarda C2'ye kıyasla daha yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, çayır alanlarında organik gübre uygulamalarının toprak fosfataz aktivitesi ve fosfor kullanılabilirliği üzerindeki etkilerinin karmaşık ve gübre türüne bağlı olduğunu; ancak verim üzerinde belirleyici etkenin doğrudan organik N girdisi olduğunu ortaya koymaktadır. Fosfataz aktiviteleri, mikrobiyal süreçler ve bitki çeşitliliği ile ilişkili olmakla birlikte, kısa vadede yem verimini açıklamakta yeterli olmamıştır.

Kataria ve arkadaşları (2024), Hindistan'ın Pencap bölgesinde yürüttükleri bu çalışmada, farklı fosfor düzeylerine sahip topraklara uygulanan organik atıkların (ahır gübresi - FYM, tavuk gübresi - PM, yeşil gübre - GM, buğday sapı - WS ve çeltik kökenli biochar - biochar) sonrasında toprakta artık fosfor (residual-P) birikimi, hareketliliği ve bitkiye yararlılığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, uzun süreli mısır-buğday rotasyon sisteminden elde edilen “orta-P” ( $12.5-22.5 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) ve “yüksek-P” ( $22.5-50.0 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) statüsündeki yüzey topraklar kullanılmıştır. Organik atıklar toprağa %1 oranında uygulanmış ve 30 ile 60 gün süreyle inkübasyona bırakılmıştır. İncelenen parametreler arasında fosfor adsorpsiyonu/desorpsiyonu, mikrobiyal biyokütle fosforu (MBP), alkalın fosfataz aktivitesi ve mısır bitkisinde P alımı yer almıştır. Çalışma sonunda araştırmacılar; FYM ve PM uygulamalarının toprakta fosfor adsorpsiyonunu en fazla azaltırken, WS ve GM ise geniş C/P oranları nedeniyle P tutulumunu arttırdığını, FYM uygulanan topraklarda Freundlich izoterm katsayılarının ( $K_f$  ve  $n$ ) en düşük düzeyde ölçüldüğünü ve bu durumun P'nin daha fazla çözünebilir formda kaldığını gösterdiğini belirtmişlerdir. FYM ve PM uygulamalarının, P desorpsiyonunu en fazla arttırdığını ve desorbe edilebilir fosforu 60 gün sonunda önemli ölçüde yükselttiğini, Langmuir ve Freundlich eşitlikleriyle yapılan modellemelerde FYM, en yüksek desorpsiyon kapasitesini ve zayıf bağlanmış P fraksiyonlarını içeren  $D_m$  ve  $K_d$  değerlerini verdiğini bulgulamışlardır. Mikrobiyal biyokütle fosforu (MBP) miktarının,  $PM > FYM > GM > WS > \text{biochar}$  sıralaması ile belirlendiğini; PM uygulaması ile yüksek-P'un toprakta  $62.1 \text{ mg kg}^{-1}$  MBP'ye ulaştırıldığını ve 60. günde MBP miktarlarında düşüş gözlemlendiğini, bunun da P desorpsiyonunun zamanla azaldığına işaret ettiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, alkalın fosfataz aktivitesini incelediklerinde; GM, WS ve FYM uygulamalarının enzim aktivitesini arttırdığını, ancak PM ve biochar uygulamalarının bu parametre üzerinde anlamlı bir etki göstermediğini ve yüksek-P topraklarında genel olarak daha düşük enzim aktivitesi kaydedildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca; bitkinin P alımını incelediklerinde, PM uygulamasının, mısırdaki en yüksek P alımını sağladığını ve FYM, GM, WS ve biochar ile karşılaştırıldığında sırasıyla %12.5, %45, %143.5 ve %208 daha fazla P alımı gerçekleştiğini, yüksek-P topraklarında P alımının, artan toprak P düzeyine bağlı olarak daha yüksek bulunduğunu bildirmişlerdir. Sun ve arkadaşları (2024), Çin'in Shanxi eyaletinde yer alan madencilik sonrası ıslah edilmiş kireçli tarım topraklarında yürüttükleri bir çalışmada, farklı hayvansal gübre

türlerinin (tavuk, domuz ve sığır gübresi) mısır verimi, mikrobiyal aktiviteler ve inorganik fosfor (Pi) dönüşüm süreçlerine etkilerini, özellikle toprak agregatları düzeyinde incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırma, beş yıl süresince uygulanan beş gübreleme stratejisini kapsamış; kontrol (gübresiz), kimyasal gübre, tavuk gübresi, domuz gübresi ve sığır gübresi uygulamaları karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında topraklar büyük makro-agregatlar ( $>2$  mm), küçük makro-agregatlar (0.25–2 mm) ve mikro-agregatlar ( $<0.25$  mm) olmak üzere üç fraksiyona ayrılmış; her bir fraksiyonda mikrobiyal biyokütle karbonu (SMBC), mikrobiyal biyokütle fosforu (SMBP), karbon ve fosfor döngüsüne ait enzim aktiviteleri (sucrase, cellulase, fosfataz ve fitaz), agregat stabilitesi ve inorganik fosfor fraksiyonları (Labile-P, Moderately labile-P, Stable-P) değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, hayvansal gübreler, özellikle tavuk gübresi, büyük makro-agregat oranını ve agregat stabilitesini artırmış; mikro-agregat oranını ise azaltmıştır. Tüm gübreleme uygulamaları Labile-P oranını anlamlı şekilde yükseltmiş (%111–190) ve Stable-P oranını düşürmüştür (%5.4–10.7). Mikrobiyal aktiviteler açısından değerlendirildiğinde, domuz gübresi SMBC ve karbon döngüsü enzimlerinde en yüksek artışı sağlarken; tavuk gübresi SMBP ve fosfor döngüsü enzim aktivitelerinde öne çıkmıştır. Fitaz ve fosfataz enzimleri ile SMBP, sırasıyla büyük, küçük ve mikro agregatlarda Pi fraksiyonlarındaki değişimlerin %81–87'sini açıklamaktadır. Yapısal eşitlik modeli (SEM) analizleri, gübre uygulamalarının agregat yapısını ve mikrobiyal aktiviteleri olumlu yönde etkilediğini, bu etkilerin Stable-P'nin Labile-P'ye dönüşümünü kolaylaştırdığını ve bunun sonucunda mısır tane veriminin %82–99 oranında arttığını göstermiştir. Tavuk gübresi, içeriğindeki yüksek aktif P ve mikrobiyal stimülatör özellikleri sayesinde, fosfor dönüşümünü en etkin biçimde teşvik eden uygulama olmuştur. Bu bulgular, hayvansal gübrelerin, özellikle tavuk gübresinin, madencilik sonrası ıslah edilmiş kireçli tarım topraklarında fosfor sınırlılığını azaltarak verim artışını sağlayabileceğini ve mikrobiyal mekanizmalar üzerinden fosfor yönetiminde sürdürülebilir bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Afangide ve arkadaşları (2020), Nijerya'nın güneydoğusunda yer alan Uyo kentinde, verimliliğini yitirmiş ultisol topraklarında yürüttükleri bu çalışmada, hayvan gübrelerinin (tavuk ve domuz) toprak fosfataz enzim aktiviteleri ile mikrobiyal özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, doğal koşullarda fermante olmuş tavuk gübresi (PM) ve domuz gübresi (SM) her biri 30 ton/ha dozunda uygulanmış ve deneme parselleri

tesadüf blokları deneme deseninde üç tekerrürlü olarak kurulmuştur. Uygulamalar sonrası topraklar 0–15 cm ve 15–30 cm derinliklerden 0., 14., 28., 42., 56., 70. ve 84. günlerde örneklenerek enzimatik ve mikrobiyal analizler yapılmıştır. Araştırma bulgularına göre, özellikle tavuk gübresi uygulanan topraklarda toprak pH'sında anlamlı artışlar gözlenmiş ve hem alkali ( $0.38\text{--}4.94 \text{ Mg g}^{-1}$ ) hem de asidik ( $0.42\text{--}3.02 \text{ Mg g}^{-1}$ ) fosfataz aktivitelerinde belirgin yükselmeler kaydedilmiştir. Mikrobiyal analizler sonucunda ise toplam heterotrofik bakteri sayısının  $1.27 \times 10^4 \text{ Cf u g}^{-1}$ 'den  $8.63 \times 10^7 \text{ Cf u g}^{-1}$ 'ye kadar yükseldiği, fungal ve aktinomiset yoğunluklarının da benzer şekilde arttığı tespit edilmiştir. Mikrobiyal yoğunluklar ile fosfataz aktiviteleri arasındaki pozitif ve anlamlı korelasyonlar, bu enzimatik aktivitelerin mikrobiyal kaynaklı olduğunu desteklemektedir. Enzim aktivitelerinde en yüksek değerler uygulamadan sonraki ikinci haftada, özellikle yüzey toprak katmanlarında gözlenmiştir. Bu bulgular, hayvan gübrelerinin sadece organik madde ve besin elementi sağlayıcı olarak değil, aynı zamanda mikrobiyal aktiviteyi ve enzimatik süreçleri artırarak toprak biyofonksiyonelliğine önemli katkı sağladığını göstermektedir.

Antonious ve arkadaşları (2020), Kentucky, ABD'de gerçekleştirdikleri bu tarla çalışmasında, farklı organik ve inorganik toprak düzenleyicilerinin (vermicompost, at gübresi, tavuk gübresi, kanalizasyon çamuru, ticari organik ve inorganik gübreler) ve bunların biochar ile kombinasyonlarının, domates bitkisinin rizosfer bölgesinde toprak enzim aktiviteleri üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Bu bağlamda, üreaz, invertaz, asidik ve alkalın fosfataz enzim aktiviteleri toprak biyolojik kalitesinin göstergeleri olarak izlenmiştir. Çalışmada, 14 farklı uygulama (7 toprak düzenleyici  $\times$  biocharlı ve biocharsız kombinasyonlar) rastgele blok deneme desenine göre üç tekerrürlü olarak kurulmuş ve uygulamalar 70 günlük domates fideleriyle gerçekleştirilmiştir. Tüm organik düzenleyiciler %5 azot eşdeğerinde uygulanmış, biochar %10 oranında karışımlara dahil edilmiştir. Sonuçlar, vermikompost uygulamasının üreaz aktivitesini yaklaşık 88 kat artırarak en yüksek değeri sağladığını göstermiştir. Tavuk gübresi ve kanalizasyon çamuru da üreaz aktivitesinde sırasıyla 3.4 ve 7 kat artış sağlamıştır. İnvertaz aktivitesi açısından en etkili uygulama at gübresi olmuş, bu uygulamada kontrol grubuna göre %130 oranında artış gözlenmiştir. Biocharın ise özellikle NM (no-mulch) kontrol toprağında üreaz ve invertaz aktivitelerini sırasıyla %66 ve %52 oranında artırdığı, ancak vermikompost ile kombine edildiğinde üreaz aktivitesinde azalma

gözlendiği raporlanmıştır. Asidik fosfataz aktivitesinde en dikkat çekici artış kanalizasyon çamuru uygulaması ile elde edilmiş; bu uygulama, biochar ilavesiyle birlikte %17.7 oranında daha yüksek aktivite sağlamıştır. Buna karşılık, alkalın fosfataz aktivitesinde uygulamalar arasında anlamlı farklılık tespit edilememiştir. Bunun nedeni olarak, düşük toprak pH'sı ve bazı eser elementlerin (ör. Cd, Pb, Zn) fosfataz aktiviteleri üzerindeki baskılayıcı etkileri gösterilmiştir. Bu bulgular, organik atıkların ve biocharın birlikte kullanımının, domates rizosferindeki toprak biyolojik aktivitesini artırabileceğini, ancak uygulama öncesi materyal özelliklerinin detaylı analizinin yapılmasının önem arz ettiğini göstermektedir.

Abdelaziz Ali ve Kızılkaya (2023), Türkiye'nin Samsun ilinde yer alan Ondokuz Mayıs Üniversitesi serasında yürüttükleri bu çalışmada, sekiz farklı bitki ve hayvan kökenli organik materyalin çilek (*Fragaria* × *ananassa* cv. Albion) bitkisinin taze biyokütlesi ile rizosfer toprağındaki dehidrogenaz enzim aktivitesi (DHA) üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada kullanılan organik materyaller %5 oranında toprağına karıştırılmış olup, bu materyaller arasında koyun gübresi, inek gübresi, tavuk gübresi, vermikompost, çay atığı, fındık kabuğı, pirinç kavuzu ve buğday sapı yer almıştır. Yürüttükleri 61 günlük sera denemesi sonucunda, hayvansal kökenli organik materyallerin (özellikle koyun gübresi) çilek bitkisinin taze ağırlığını kontrol grubuna göre anlamlı şekilde artırdığı belirlenmiştir. En yüksek bitki ağırlığı koyun gübresi uygulamasında kaydedilirken, bitkisel atıklardan (örneğin çay atığı ve fındık kabuğı) elde edilen uygulamaların taze ağırlık üzerinde olumsuz etkileri gözlenmiştir. Araştırmacılar, bu durumun temel nedenini bitkisel atıkların toprakta daha yavaş ayrışmaları ve azot gibi bazı besin elementlerini geç salmalarıyla açıklamışlardır. Dehidrogenaz aktivitesi açısından değerlendirildiğinde, tüm organik materyal uygulamaları DHA seviyelerini kontrol grubuna kıyasla anlamlı düzeyde artırmıştır. En yüksek DHA değeri,  $157.33 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$  ile koyun gübresi uygulamasında elde edilmiş, bunu sırasıyla inek gübresi ve vermikompost takip etmiştir. Buna karşılık, bitkisel kaynaklı materyaller (özellikle buğday sapı ve fındık kabuğı) DHA'yı daha sınırlı düzeyde artırabilmiştir. Bu farkın, hayvansal organik materyallerin mikrobiyal topluluklar tarafından daha hızlı ayrıştırılabilmesiyle ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte, vermikompostun yüksek EC (elektriksel iletkenlik) değerine rağmen DHA'yı düşürmemesi, içeriğindeki bitki büyüme düzenleyici bileşiklerin bu etkiyi

baskıladığı şeklinde yorumlanmıştır. Bulgular, farklı organik materyallerin hem toprak enzimatik fonksiyonları hem de bitki gelişimi üzerindeki etkilerinin materyalin kimyasal yapısı ve ayrışabilirlik özelliklerine göre değişebileceğini ortaya koymaktadır.

Doyeni ve arkadaşları (2023), Litvanya'nın ılıman iklim koşullarına sahip kuzey bölgesinde üç yıl boyunca yürüttükleri bu çalışmada, hayvansal gübrenin tarım topraklarına uygulanmasının, toprak mikrobiyal biyokütlesi (SMBC), dehidrogenaz aktivitesi (DHA) ve tahıl verimi üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma, iki ayrı deneme alanında, domuz (PD), tavuk (CHD) ve sığır (COD) gübresi ile sentetik azot gübresi (SN) ve gübre uygulanmayan kontrol grubu (CTR) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulamalar sonucunda, mikrobiyal biyokütle karbonunu ilk yıl %20.2, üçüncü yıl ise %75'e varan oranlarda artırdığı belirlenmiştir. En yüksek SMBC değerleri CHD uygulamasında, en düşük değerler ise kontrol grubunda kaydedilmiştir. DHA değerleri ise yıllar içinde artış göstermiş; sığır gübresinde (COD), her iki deneme alanında da en yüksek DHA seviyesine ulaşarak  $4.83 \mu\text{g TPF g}^{-1} \text{h}^{-1}$  değerini vermiştir. Bu, COD'nin yüksek organik madde içeriği ve düşük antibiyotik kalıntısı taşımasıyla ilişkilendirilmiştir. Toprak enzim aktivitesine yönelik analizler, özellikle gübre uygulamalarının DHA üzerindeki etkisinin SN'ye kıyasla daha güçlü olduğunu göstermiştir. Ancak üçüncü yıl itibarıyla DHA'nın duyarlılığı azalmış; bu da zamanla oluşan mikrobiyal adaptasyonun veya toprakta biriken sindirim yan ürünlerinin potansiyel etkisini düşündürmektedir. Üç yıl süresince yapılan verim analizlerinde ise, ilk yıl SN uygulamaları daha yüksek tahıl verimi sağlarken, sonraki iki yılda gübre uygulamaları SN'yi geçmiştir. Özellikle üçüncü yılda gübrelenen parsellerde verim SN'ye göre %18 daha yüksek bulunmuştur.

Guo ve arkadaşları (2023), asit karakterli topraklarda mısır (*Zea mays* L.) yetiştiriciliği sırasında kısa vadeli organik gübre (hayvan gübresi) uygulamasının hem toprak fosfataz aktivitesi hem de fosfor mineralize edici bakteriyel topluluklar üzerindeki etkilerini irdeledikleri bir serada yürütülen saksı deneyi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, bakteriyel phoC ve phoD genlerini taşıyan mikroorganizmaların, toprakta asidik (ACP) ve alkalik (ALP) fosfataz enzimlerinin üretiminden sorumlu olduğu göz önünde bulundurularak, bu genlere sahip bakterilerin yapısal ve işlevsel değişimleri detaylı olarak incelenmiştir. Denemede, 6 farklı dozda domuz gübresi (0, 1, 5, 10, 20 ve 50 g kg<sup>-1</sup> kuru toprak) uygulanmış; topraklar ya mısır bitkisi ile birlikte (rizosfer) ve bitkisiz olarak

değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, rizosfer bölgesi, toprak kütlelerine kıyasla daha yüksek ACP ve ALP aktivitesi göstermiş; bu etki, gübre uygulamasının etkisinden daha baskın bulunmuştur. Özellikle phoD-taşıyan bakterilerin çeşitliliği ve yapısı, hem gübre dozlarından hem de rizosfer etkisinden anlamlı şekilde etkilenmiştir. Diğer yandan, phoC-taşıyan bakteriler daha az değişkenlik sergilemiş ve esas olarak rizosfer etkisi altında kalmıştır. ACP aktivitesinin, bitki kökenli sekresyonlarla daha çok ilişkili olduğu saptanmıştır. Bu durum, kök bölgesinde artan fosfor alımının mikrobiyal ACP üretimini baskılaması ile açıklanmıştır. Bu çalışma, organik gübrelemenin asit topraklardaki mikrobiyal fosfor mineralizasyonuna etkisinin, bitki rizosferinin dinamik ortamıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamakta; özellikle kısa vadeli gübreleme stratejilerinde rizosfer etkisinin göz ardı edilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Shaaban ve arkadaşları (2023), Pakistan'ın Multan bölgesine ait tuzlu (Solonchak) ve sodyumca zengin (Solonetz) topraklarda yürüttükleri bu çalışmada, alçıtaşı (gypsum), ahır gübresi ve pirinç sapı uygulamalarının toprak enzim aktiviteleri, organik madde mineralizasyonu ve CO<sub>2</sub> emisyonları üzerindeki etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, her iki toprak tipine de bu üç farklı uygulama eşit dozlarda (10 g/kg toprak) uygulanmış ve 66 günlük inkübasyon süresince toprakların kimyasal, mikrobiyal ve biyokimyasal dinamikleri izlenmiştir. Solonchak ve Solonetz topraklarının başlangıçtaki pH (8.0 ve 8.9), EC (6.5 ve 1.6 dS/m) ve SAR (2.5 ve 17) düzeyleri dikkate alındığında, uygulamaların özellikle alçıtaşının bu parametreleri anlamlı şekilde azalttığı (pH'da 0.62 ve 0.30; EC'de 2.9 ve 0.7 dS/m; SAR'da 1.2 ve 5.7 birim azalma) belirlenmiştir. Ahır gübresi ve çeltik sapı, özellikle mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC) ve nitrojeni (MBN), çözülmüş organik karbon (DOC) ve enzim aktivitelerinde (üreaz, invertaz, katalaz, fosfataz, fenol oksidaz) belirgin artışlar sağlamıştır. Araştırmada, yüksek sodyum adsorpsiyon oranına sahip olan Solonetz topraklarında çözülmüş organik karbon ve CO<sub>2</sub> salınımı daha fazla olurken, mikrobiyal biyokütle düzeyi görece daha düşüktür. Tüm enzim aktiviteleri ile CO<sub>2</sub> salınımı arasında anlamlı pozitif korelasyonlar bulunmuş; özellikle ahır gübresi uygulaması en yüksek enzimatik tepkileri tetiklemiştir. Bu bağlamda, uygulanan organik ve inorganik materyallerin toprak pH'sını düşürerek çözülmüş organik karbonu artırdığı ve bunun mikrobiyal aktiviteyi ve dolayısıyla karbon kaybını hızlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Yerli (2023), Van ilinde yürüttüğü bu kontrollü sera çalışmasında, ahır gübresi ve farklı piroliz sıcaklıklarında (200, 300, 400 ve 500°C) hazırlanmış biocharların toprağın kimyasal-fiziksel özellikleri, enzim aktiviteleri ve CO<sub>2</sub> salınımı üzerindeki etkilerini, arıtılmış atık su ve tatlı suyla sulama koşullarında karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Denemeler, 36 farklı kombinasyonda (6 uygulama × 2 su kaynağı × 3 tekerrür) tasarlanmıştır. Çalışma bulgularına göre, düşük sıcaklıkta (200°C) hazırlanan biocharlar, toprakta organik madde, toplam azot, katyon değişim kapasitesi (CEC), porozite, ıslak agregat stabilitesi ve enzimatik aktiviteler (üreaz, dehidrogenaz, alkalın ve asidik fosfataz) açısından daha olumlu etkiler göstermiştir. En yüksek enzim aktivitesi ise doğrudan ahır gübresi uygulamasında elde edilmiştir. Ancak, yüksek sıcaklıkta (500°C) piroliz edilmiş biochar, toprakta EC ve pH düzeylerini daha fazla artırmış, bununla birlikte CO<sub>2</sub> emisyonlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Ahır gübresi uygulaması topraktan yaklaşık %20.6 ila %100 daha fazla CO<sub>2</sub> salınımına neden olurken, biochar uygulamaları CO<sub>2</sub> emisyonunu önemli ölçüde azaltmıştır. Yüksek EC ve pH'ın mikrobiyal aktiviteyi sınırlandırarak mineralizasyonu azalttığı, böylece CO<sub>2</sub> salınımını da düşürdüğü belirtilmiştir.

Kumari ve arkadaşları (2024), Hindistan'ın yarı kurak kuzeybatı bölgesinde yer alan Hissar kentinde, organik gübreler (ahır gübresi – FYM, presmud – PRM ve tavuk gübresi – POM) ile kimyasal gübrelerin farklı kombinasyonlarının, toprak organik karbon fraksiyonları, mikrobiyal biyokütle (MBC, MBN) ve toprak enzimatik aktiviteleri (DHA, APA, ASA, üreaz) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu kapsamda yürütülen çalışma, inci darısı – buğday münavebe sistemi altında gerçekleştirilmiş ve toplam sekiz farklı gübreleme uygulaması üç yıl boyunca karşılaştırılmıştır. Yürütülen bu çalışmada araştırmacılar, özellikle FYM ile NP gübresinin birlikte uygulandığı muamelenin (FYM 15N150P30), toprak biyolojik özelliklerini en üst seviyede iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Bu muamele, 0–15 cm toprak derinliğinde en yüksek toplam organik karbon (%1.18), çözünür organik karbon (64.74 mg kg<sup>-1</sup>), mikrobiyal karbon (618.40 mg kg<sup>-1</sup>), DHA (72.83 µg TPF g<sup>-1</sup> 24h<sup>-1</sup>), alkalın fosfataz (APA: 685.44 µg PNP g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) ve arilsülfataz (ASA: 12.56 µg PNP g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>) değerlerini sağlamıştır. Diğer uygulamalarla karşılaştırıldığında, yalnızca kimyasal gübre kullanılan parsellerde (T1 ve T2), MBC ve DHA gibi biyolojik parametrelerde önemli düşüşler gözlemlenmiştir. FYM, PRM ve POM uygulamaları ise bu parametreleri önemli ölçüde artırmış; FYM uygulaması

MBC'yi %86.3, DHA'yı %73.3 oranında yükseltmiştir. Enzim aktiviteleri açısından, FYM + NP uygulaması tüm diğer muamelelerden anlamlı biçimde ayrılmıştır. Araştırmacılar, bu etkinin organik maddeyle sağlanan karbon kaynağının mikroorganizmalar tarafından daha verimli kullanılmasından ve mineral gübrelerle sağlanan N ve P desteğiyle enzim üretiminin tetiklenmesinden kaynaklandığını vurgulamışlardır.

Kaur ve arkadaşları (2024), Pencap agro-ekolojik koşullarında yürüttükleri bu tarla çalışmasında, uçucu kül (fly ash, FA) ve tavuk gübresinin (poultry manure, PM), önerilen kimyasal gübre dozu (RDF) ile birlikte mısır (*Zea mays* L.) bitkisi altında toprak enzim aktiviteleri ve mikrobiyal biyokütle üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma, tesadüf blokları deneme deseni (RBD) altında sekiz farklı gübreleme stratejisi ile yürütülmüş ve enzimatik göstergeler olarak dehidrogenaz (DHA), üreaz, arilsülfataz ve fosfataz aktiviteleri izlenmiştir. En yüksek mikrobiyal ve enzimatik aktivite, %100 RDF + %100 PM içeren T2 uygulamasında elde edilmiştir. Bu uygulama, 30, 60 ve 90. günlerde DHA'yı sırasıyla 29.7, 35.4 ve 19.4  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ; üreaz aktivitesini 25.7, 33.1 ve 21.7  $\mu\text{g NH}_4^+ \text{ g}^{-1} 2 \text{ h}^{-1}$  olarak yükseltmiştir. Benzer şekilde, arilsülfataz ve fosfataz aktiviteleri de T2 uygulamasında maksimum seviyeye ulaşmış, bu da organik maddece zengin tavuk gübresinin mikrobiyal faaliyetleri teşvik edici etkisini açıkça ortaya koymuştur. FA'nın tek başına ya da yüksek dozlarla uygulanması, enzim aktiviteleri üzerinde baskılayıcı etki göstermiş; bu durum muhtemelen toprak pH'ındaki artış ve organik karbon seyreltmesiyle ilişkilendirilmiştir. Buna karşın, düşük düzeyde FA (%10) uygulaması içeren T3 kombinasyonu (%10 FA + %90 PM + %90 RDF), hem enzimatik aktivitelerde hem de mikrobiyal biyokütlerde ikinci en yüksek düzeyleri sağlamıştır. Toprak mikrobiyal biyokütlesi (MBC) bakımından da T2 uygulaması en yüksek değeri sağlamış ( $197.4 \mu\text{g C g}^{-1}$ ), kontrol grubuna göre %46.1'lik bir artış göstermiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Deneme materyali

Denemede farklı pH'ya sahip ( $\text{pH} < 6.5$ ,  $\text{pH} = 7-7.2$ ,  $\text{pH} > 8$ ) 3 farklı toprak, 2 farklı fosforlu gübre [Triple Super Fosfat (TSP, %39 suda çözünür  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ve ham kaya fosfat (HKF, %28 sitrik asitte çözünür  $\text{P}_2\text{O}_5$ )] ve 3 farklı organik gübre [biochar, vermikompost ve ahır gübresi (AG)] kullanılmıştır ve bu deneme 4 tekerrürlü olarak toplam 108 saksıda yürütülmüştür.

Araştırmada kullanılan topraklar farklı pH değerlerini sağlayabilmek amacıyla farklı bölgelerden alınmıştır. Araştırma topraklarından asidik toprak (pH değeri 5.2) Trabzon'un Sürmene İlçesinde bir çay bahçesinden ( $40^\circ 92' 73''$  K ve  $40^\circ 23' 16''$  D), nötr toprak (pH değeri 6.9) Tokat'ın Almus İlçesinden ( $40^\circ 21' 53''$  K ve  $36^\circ 45' 90''$  D) ve bazık toprak (pH'sı 8.0) Tokat'ın Turhal İlçesinden ( $40^\circ 32' 91''$  K ve  $36^\circ 14' 57''$  D) 0-20 cm'den alınmış ve 4 mm'lik elekten geçirildikten sonra saksılara yerleştirilmiştir. Araştırma topraklarının deneme kurulmadan önce temel verimlilik analizleri yapılmış ve Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneme kullanılan topraklarının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

|                          | Asit Toprak | Nötr Toprak | Bazık Toprak |
|--------------------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>pH</b>                | 5.2         | 6.9         | 8.0          |
| <b>EC</b>                | 50          | 150         | 290          |
| <b>Kireç (%)</b>         | 0           | 1.32        | 7.95         |
| <b>Organik Madde (%)</b> | 2..9        | 2.48        | 2.1          |
| <b>% Kil</b>             | 29.28       | 33.38       | 33.33        |
| <b>% Silt</b>            | 27.77       | 27.71       | 40.15        |
| <b>% Kum</b>             | 42.95       | 38.91       | 26.52        |
| <b>Tekstür Sınıfı</b>    | Killi Tın   | Killi Tın   | Killi Tın    |
| <b>N (%)</b>             | 0.030       | 0.038       | 0.06         |
| <b>P (%)</b>             | 6.36        | 7.32        | 10.8         |
| <b>K (%)</b>             | 55.16       | 42.16       | 44.68        |

Araştırmada fosforlu gübre olarak TSP (%39 suda çözünür  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ve ham kaya fosfat (%28 sitrik asitte çözünür  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) ile organik gübre olarak biochar, vermikompost ve ahır gübresi tercih edilmiştir. Araştırma, belirlenen konuların toprak materyaline uygulandığı

inkübasyon denemesi ve model bitki olarak seçilen mısır bitkisinin yetiştirildiği saksı denemesi olacak şekilde iki aşamalı olarak yürütülmüştür. Araştırmanın ilk aşamasını oluşturan inkübasyon çalışması için fırın kuru ağırlıkça 1 kg toprak, denemenin ikinci kısmı olan mısır bitkisi yetiştirme aşaması için ise yine fırın kuru ağırlıkça 2 kg toprak olacak şekilde tartılan topraklar homojen boyutta saksılara yerleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, toprak dolu saksılara, 80 mg  $P_2O_5$   $kg^{-1}$  sağlayacak şekilde TSP ve ham kaya fosfat sulu çözeltisi iki ayrı fosforlu gübre kaynağı olacak şekilde uygulanmıştır. Fosforlu gübre uygulamasına ilave olarak her saksı toprağına 150 mg N  $kg^{-1}$  ve 150 mg K  $kg^{-1}$  olacak şekilde potasyum nitrat(%13 N, %46  $K_2O$ ) ve üre (%46 N) gübresi verilmiştir.

Araştırma konuları gereği, organik materyal olarak kullanılan vermikompost ve ahır gübresi ağırlık esaslı olarak %4, biochar ise %2 olacak şekilde saksı toprağına iyice karıştırılarak uygulanmışlardır. Gübrelerin verilmesi işlemlerinden sonra bitkili deneme saksılarına her saksıya 5 mısır tohumu ekilmiş ve hem saksı hem de inkübasyon çalışmasına tarla kapasitesinin %60'ına gelecek şekilde saf su ilave edilerek deneme kurulmuştur. Denemenin her iki aşaması da 3 farklı toprakta, 2 farklı fosforlu gübre ve 3 farklı organik gübre ile 4 tekerrürlü olarak, toplam 108 saksıda yürütülmüştür. Denemenin sonunda her bir uygulama saksısından örnekler alınarak analiz edilmiştir. Deneme sonunda saksılardaki topraklar temiz bir yüzeye serilip iyice karıştırılarak analizler için ihtiyaç duyulan kadarı alınıp analize hazırlanmıştır.

### 3.1.2. Deneme planı

Deneme, aynı uygulamaların yapıldığı bitkisiz saksılarda inkübasyon ve mısır bitkisi ekilmiş saksılarda bitkili olmak üzere iki aşamalı yürütülmüştür. Çalışmada yapılan uygulamalarla ilgili plan Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deneme planı ve yapılan uygulamalar.

|   | <b>Asidik toprak</b>             | <b>Nötr toprak</b>               | <b>Bazik toprak</b>              |
|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Kontrol                          | Kontrol                          | Kontrol                          |
| 2 | TSP                              | TSP                              | TSP                              |
| 3 | Ham Kaya Fosfat                  | Ham Kaya Fosfat                  | Ham Kaya Fosfat                  |
| 4 | TSP+Biochar                      | TSP+Biochar                      | TSP+Biochar                      |
| 5 | TSP+Vermikompost                 | TSP+Vermikompost                 | TSP+Vermikompost                 |
| 6 | TSP+AG                           | TSP+AG.                          | TSP+AG                           |
| 7 | Ham Kaya Fosfat<br>+Biochar      | Ham Kaya Fosfat<br>+Biochar      | Ham Kaya Fosfat<br>+Biochar      |
| 8 | Ham Kaya Fosfat<br>+Vermikompost | Ham Kaya Fosfat<br>+Vermikompost | Ham Kaya Fosfat<br>+Vermikompost |
| 9 | Ham Kaya Fosfat<br>+AG           | Ham Kaya Fosfat<br>+AG           | Ham Kaya Fosfat +AG              |

İlk denemede uygulamalar yapıldıktan sonra her uygulamadan örnekler alınarak 1 ve 12 saat sonra ve 1, 3, 5 ve 7 gün sonra denge çözeltisi yöntemi ile topraktaki fosfor adsorbsiyonlarına bakılmıştır. İkinci denemede ise bir model bitki (mısır) ile aynı işlemler uygulanarak ve hem toprakta hem de bitkideki fosfor miktarındaki değişimler gözlemlenmiştir. Fosforun yanı sıra topraktaki mikro besin elementi değişimlerine, enzim aktivitelerine ve mikrobiyal biyokütleyle olan etkileri araştırılmıştır.

### 3.2. Yöntem

#### 3.2.1. Çalışmada yapılan analizler

Çalışma sonunda, denemenin her iki aşamasında da alınan toprak örnekleri analize hazırlanmış ve gerekli analizler belirtilen yöntemlerle yapılmıştır.

**Tekstür;** Toprak örneğinin kil, silt ve kum fraksiyonları Bouyoucos (1962) tarafından bildirildiği şekilde hidrometre yöntemine göre belirlenmiştir.

**pH;** 1:2.5 oranındaki toprak:safsu karışımında cam elektrotlu pH metre ile belirlenmiştir (Richard, 1954). Havada kurutulmuş ve 2 mm'lik ince elekten elenmiş 10 gr toprak örneği 50 ml kapasiteli bir behere konur ve üzerine 25 ml saf su ilave edilir. Bu karışım iyice karıştırıldıktan sonra pH'sı pH metre ile okunmuştur.

**EC;** 1:5 oranındaki toprak:safsu karışımında elektriki geçirgenlik aleti kullanılarak ölçülmüştür (U.S. Salinity Lab. Staff, 1954). Havada kurutulmuş ve 2 mm'lik ince elekten elenmiş 8 gr toprak örneği 50 ml kapasiteli bir behere konur ve üzerine 40 ml saf su ilave edilir. Bu karışım iyice karıştırıldıktan sonra EC metre ile okunmuştur.

**Kireç;** Scheibler Kalsimetresiyle oluşan CO<sub>2</sub> hacminin belirlenmesi yöntemiyle tespit edilmiştir (Allison ve Moodie, 1965).

**Organik madde;** Walkley- Black metodu ile belirlenmiştir. Buna göre, 0.5 gr toprak örnekleri 500 ml'lik erlenmayerlere konularak üzerlerine 10 ml 1 N K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (potasyum dikromat) çözeltisi, 20 ml konsantre sülfürik asit konulup bir dakika karıştırıldıktan ve 30 dakika bekletildikten sonra 200 ml saf su ile 3-4 damla o-fenontrolin kompleks indikatörü katılarak FeSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O (demirsülfatheptahidrat) çözeltisiyle ortamın rengi maviden kırmızıya dönene kadar titre edilerek belirlenmiştir (Tüzüner, 1990).

**İnorganik azot;** Kjeldahl Metodu ile 2 N KCl çözeltisi ekstraktında belirlenmiştir (Bremner, 1965).

**Toplam fosfor;** Toprak örnekleri 0.25 mm'lik elekten geçirildikten sonra 0.3 g tartılmış üzerine 1 ml HF+4 ml HCl+5 ml HNO<sub>3</sub> ilave edilerek yüksek basınç (200 PSI) altında mikrodalga cihazında (Cem MarsXpress) çözündürülmüştür. Çözündürülen örnekler deiyonize saf su ile 25 ml'ye tamamlanıp mavi bantlı filtre kâğıdı ile süzölmüştür. Süzölen örneklerin toplam-P miktarları ICP-OES (Agilent, 5110) cihazı ile okunmuştur (Hou ve ark., 1994).

**Organik fosfor;** Hava kuru toprak örneklerinden 1 g alınarak 550°C'de yakılmış ve yanan topraktan 1N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile ekstraksiyon alınarak molibdoforforik mavi renk yöntemiyle spektrofotometrede okunmuştur (Walker ve Adams, 1958).

**Yarayışlı fosfor;** Alkali ve nötr topraklardaki yarayışlı P, Olsen'in NaHCO<sub>3</sub> metoduyla tespit edilmiştir (Olsen ve ark, 1954). Asidik topraktaki yarayışlı P ise Bray ve Kurtz No. 1 metoduyla tespit edilmiştir. (Bray ve Kurtz, 1945)

**Ekstrakte edilebilir K;** Toprak örneklerinden 5 g alınarak nötr pH'lı 1 N amonyum asetat ile muamele edilim ekstraksiyon alınmış ve örneklerin okuması Fleym fotometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Carson, 1980).

**Alınabilir Fe, Zn, Cu ve Mn;** Lindsay ve Norvell (1978)'e göre 0.005 M DTPA + 0.01 M CaCl<sub>2</sub> + 0.1 TEA (pH: 7.3) ile ekstraksiyondan sonra ICP-OES (Varian-Vista) ile tespit edilmiştir.

**Alınabilir B;** Cartwright ve ark. (1985) tarafından bildirildiği şekilde 0.01 M CaCl<sub>2</sub> + 0.01 M Mannitol çözeltisi ile ekstrakte edilerek ICP-OES (Varian-Vista) ile belirlenmiştir.

**Mikrobiyal biyokütle;** Mikrobiyal biyokütle fümigasyon, ekstraksiyon metoduyla belirlenmiştir (Horwath ve Paul, 1994). Bu yöntemde iki ayrı 100 ml'lik erlene aynı örnekten 20 g toprak örneği konulur. Toprak nemi tarla kapasitesinin %60'ına ayarlanır. Fumige edilen topraklar 5:1 oranında 0.5 M K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile ekstrakte edilir. Bu ekstraktlardan 10-15 ml alınarak 1 g K<sub>2</sub>O<sub>8</sub>S<sub>3</sub> (persülfat) ve 1 ml 0.025 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile muamele edilir ve içinde ayrı bir kaba konulmuş olan NaOH titrasyona tabi tutularak CO<sub>2</sub> belirlenir. Bu fümige edilmiş ve fümige edilmemiş örnekler arasındaki fark bize mikrobiyal biyokütle C'ü verir.

**Fosfotaz enzim aktivitesi;** Toprak örneklerinden 1 g (< 2 mm geçmiş) alınarak 50 ml erlanmayer içerisine konur ve üzerine 0.2 ml toluen ve 4 ml modifiye edilmiş baffle çözeltisi ilave edilerek 25°C de 1 saat süreyle inkübe edilir. İnkübasyon sonunda örneklerle gerekli kimyasallar eklenerek süzük alınır ve süzük spektrofotometrede okunarak fosfataz enzim içerikleri belirlenmiştir (Tabatabai, 1994).

**Dehidrogenaz enzim aktivitesi;** Analiz için hazırlanmış olan toprak örneklerinden 20 g alınır ve içerisine 0.2 g CaCO<sub>3</sub> ilave edilerek karıştırılır ve bu karışımdan 6'şar g alınarak test tüplerine konur. Her bir test tüpüne 1ml %3'lük 2,3,5-Triphenytetrazolium klorid çözeltisi ve 2.5 ml saf su ilave edilerek 37 °C'de 24 saat inkübasyona tabi tutulur. İnkübasyon sonunda tüpler açılıp 10 ml methanol ilave edilerek örnekler filtreden geçirilir. Süzüklerde oluşan kırmızımsı renk spektrofotometrede okunarak dehidrogenaz enzim aktivitesi belirlenmiştir (Tabatabai, 1994).

**Fosfor Adsorpsiyonu;** Deneme topraklarında Pierzynski'nin Denge çözeltisi yöntemine göre adsorpsiyon çalışması yapılmıştır. Buna göre her bir uygulama toprağından 1 g 50 ml'lik falkon tüpüne tartılmış ve 100 ppm P olacak şekilde KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> kimyasalından

hazırlanan çözeltiden 25 ml eklenmiştir. Elde edilen bu çözeltiler çalkalama işlemlerinden sonra filtre kağıdından geçirilerek sıvı fazlı ayrılıp kolorimetrik fosfor analizi yapılmıştır. Renklendirme prosedürü için askorbik asit ile renklendirme işlemi yapılmıştır. Toprakların zamana bağlı olarak adsorpsiyon artışını gözlemlemek amacıyla topraklara uygulanan fosforlu çözelti 1 saat, 1 gün, 3 gün, 5 gün ve 7 gün boyunca toprakla temas ettirilmiş ve bu süreç sonunda analizler tekrarlanmıştır. Yapılan analizlerin sonuçları asidik, nötr ve bazik toprakta ayrı ayrı değerlendirilmiştir (Pierzynski, 2000).

### **3.2.2. Bitki analizleri**

Denemenin ikinci kısmında mısır bitkisi vejetatif gelişimlerini tamamladıktan sonra hasat edilip, 70 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulup öğütülerek ve 5 ml konsantre HNO<sub>3</sub> ve 2 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (%30 w/v) ile mikro dalga cihazında yüksek sıcaklık (210 °C) ve basınç altında (200 PSI) çözündürülmüştür. Çözündürülen numunelerin hacimleri saf su ile 20 ml’ye tamamlanarak numunelerde ICP-OES cihazında toplam P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Mn, Cu ve B tayinleri yapılmıştır (Soltanpour ve Workman, 1981).

### **3.2.3. İstatistiksel analizler**

Çalışma Tesadüf Parsellerinde Faktöriyel Deneme Deseninde yürütülmüştür. Elde edilen veriler Varyans Analizi (ANOVA) ve en küçük ortalama fark testi yapılarak  $\alpha = 0.05$  önemlilik düzeyine göre SPSS paket programında ortalamalara Duncan testi uygulanmıştır.

Çalışmada her bir toprak için başvuru tanımlayıcı istatistiklerden olan değişim katsayısı, çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) parametreleri, veri setlerinin dağılım özelliklerini yorumlamada önemlidir. Değişim katsayısı, standart sapmanın aritmetik ortalamaya oranı olarak hesaplanmakta olup, değişkenliğin göreceli olarak düzeyini ifade eder. Toprak özelliklerindeki değişim katsayısı dikkate alınarak üç grupta değerlendirilmiştir. Değişim katsayısı %15’ten küçük olanlar düşük derecede, 16 ile 35 arası olanlar orta derecede ve 36’dan büyük olanlar yüksek derecede değişken olarak sınıflandırılmıştır (Upchurch ve ark., 1988). Çarpıklık katsayısı, dağılımın simetri durumunu tanımlar; pozitif çarpıklık sağa çarpık, negatif çarpıklık ise sola çarpık dağılımları işaret ederken, çarpıklık katsayısının sıfıra yakın olması dağılımın simetrik

olduğunu gösterir. Basıklık katsayısı ise dağılımın tepe noktasının sivriliğini ya da basıklığını belirtir. Bazı araştırmalara göre skewness ve kurtosis değerlerinin  $\pm 1.5$  ve  $\pm 2$  aralığında olduğunda normal dağılım gösterdiği ve bazı kaynaklara göre bu aralığın  $\pm 3$  olarak kabul edildiği bilinmektedir (Tabachnick and Fidell, 2013; George and Mallery, 2010).



## **4. BULGULAR ve TARTIŞMA**

### **4.1. Toprak İnkübasyon Denemesi**

#### **4.1.1. Toprak pH sonuçları ve istatistiksel veriler**

Toprak pH'sı, toprakta gerçekleşen fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri doğrudan etkileyen oldukça önemli temel toprak özelliğinden biridir. Toprakta özellikle fosfor gibi pH'ya duyarlı elementlerin alınabilirliği, mikrobiyal aktivite ve enzimatik süreçlerin verimliliği toprak reaksiyonuna doğrudan bağlıdır (Hinsinger, 2001). Bu nedenle, inkübasyon çalışmasında pH'nın organik materyal ve fosforlu gübre uygulamalarıyla nasıl sonuçlar verdiği, özellikle fosforun topraktaki yönetiminin sürdürülebilirliği açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Toprak inkübasyon çalışmasının pH analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın pH üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik topraklarında düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır. Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta Kontrol, TSP, TSP+Vermikompost, Ham kaya fosfat (HKF)+ AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, HKF, HKF+Vermikompost gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP+Biochar, TSP+AG, HKF+Biochar gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğunu göstermektedir. Nötr toprakta ise TSP+Vermikompost, TSP+AG ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, TSP+Biochar, HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının normal dağılım gösterdiği ve Kontrol, HKF+AG gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir. Bazik toprakta ise Kontrol, HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, TSP+Biochar, HKF+Biochar, HKF+AG gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP+Vermikompost, TSP+AG, HKF gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre pH'nın normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprağın uygulamalarının sonuçları incelendiğinde de pH'nın normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. İnkübasyon topraklarının pH analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | pH   |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min. | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Konrtol          | 4.10 | 4.20 | 4.12 | 0.05      | 0.003   | 1.21              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP              | 4.00 | 4.30 | 4.17 | 0.13      | 0.016   | 2.99              | -1.12              | 2.23  |
|        | TSP+Biochar      | 4.10 | 4.50 | 4.30 | 0.23      | 0.053   | 5.34              | 0.00               | -6.00 |
|        | TSP+Vermikompost | 4.30 | 4.40 | 4.37 | 0.05      | 0.003   | 1.14              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+AG           | 4.90 | 5.20 | 5.07 | 0.15      | 0.023   | 2.95              | -0.37              | -3.90 |
|        | Öğt. Fosfat(HKF) | 5.40 | 5.80 | 5.57 | 0.17      | 0.029   | 3.05              | 0.75               | 0.34  |
|        | HKF+Biochar      | 4.80 | 5.20 | 5.00 | 0.18      | 0.033   | 3.60              | 0.00               | -3.30 |
|        | HKF+Vermikompost | 5.00 | 5.20 | 5.13 | 0.10      | 0.009   | 1.85              | -0.86              | -1.29 |
|        | HKF+AG           | 5.30 | 5.40 | 5.37 | 0.05      | 0.003   | 0.93              | -2.00              | 4.00  |
| Nötr   | Konrtol          | 6.60 | 6.90 | 6.78 | 0.15      | 0.023   | 2.21              | -0.37              | -3.90 |
|        | TSP              | 6.20 | 6.40 | 6.33 | 0.10      | 0.009   | 1.50              | -0.86              | -1.29 |
|        | TSP+Biochar      | 6.30 | 6.50 | 6.43 | 0.10      | 0.009   | 1.47              | -0.86              | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 6.30 | 6.60 | 6.48 | 0.13      | 0.016   | 1.93              | -1.13              | 2.23  |
|        | TSP+AG           | 6.30 | 6.60 | 6.48 | 0.13      | 0.016   | 1.93              | -1.13              | 2.23  |
|        | Öğt. Fosfat(HKF) | 6.70 | 6.80 | 6.78 | 0.05      | 0.002   | 0.73              | -2.00              | 4.00  |
|        | HKF+Biochar      | 6.10 | 6.30 | 6.18 | 0.10      | 0.009   | 1.53              | 0.86               | -1.29 |
|        | HKF+Vermikompost | 6.20 | 6.50 | 6.35 | 0.13      | 0.017   | 2.03              | 0.00               | -1.20 |
|        | HKF+AG           | 6.30 | 6.80 | 6.58 | 0.26      | 0.069   | 4.00              | -0.12              | -5.29 |
| Bazik  | Konrtol          | 7.40 | 7.70 | 7.53 | 0.13      | 0.016   | 1.66              | 1.13               | 2.23  |
|        | TSP              | 7.60 | 7.80 | 7.70 | 0.08      | 0.007   | 1.05              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 8.00 | 8.20 | 8.13 | 0.10      | 0.009   | 1.17              | -0.86              | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 8.20 | 8.30 | 8.25 | 0.06      | 0.003   | 0.69              | 0.00               | -6.00 |
|        | TSP+AG           | 7.80 | 8.20 | 8.03 | 0.21      | 0.042   | 2.56              | -0.20              | -4.86 |
|        | Öğt. Fosfat(HKF) | 8.10 | 8.30 | 8.20 | 0.12      | 0.013   | 1.40              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF+Biochar      | 8.30 | 8.50 | 8.43 | 0.10      | 0.009   | 1.12              | -0.86              | -1.29 |
|        | HKF+Vermikompost | 8.00 | 8.20 | 8.15 | 0.10      | 0.010   | 1.22              | -2.00              | 4.00  |
|        | HKF+AG           | 8.30 | 8.50 | 8.43 | 0.10      | 0.009   | 1.12              | -0.86              | -1.29 |

İnkübasyon denemesi pH analiz sonuçları yapılan uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p<0.05$ ). Yapılan Duncan testi sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Farklı harfler aynı toprak grubunda uygulamaların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir. Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması toprak reaksiyonunda anlamlı değişime neden olmuştur. İnkübasyon denemesi bulgularına göre, asidik topraklarda uygulanan fosforlu gübreler ve organik materyaller pH üzerinde önemli farklılıklar meydana getirmiştir ( $p<0.05$ ). En düşük pH değeri 4.1 ile kontrol grubunda ölçülürken, Ham kaya fosfat (HKF) uygulaması pH’yı en yüksek (5.6) çıkarmıştır. pH değerindeki bu artış, fosfat kayasının asidik ortamda çözünürlüğünün artmasıyla hidrojen iyonlarının nötralizasyonundan ileri gelebilir (Obihara ve Russell, 1972). Organik materyallerin (özellikle ahır ve vermikompost gübresi) mineralizasyon sürecinde açığa çıkan bazik anyonların (örneğin  $\text{HCO}_3^-$ ) da bu etkide katkısı olduğu düşünülmektedir (Haynes, 1982). Nötr topraklardaki pH değişimi incelendiğinde, asidik topraklara göre değişimin daha dar aralıkta olduğu görülmüş ve özellikle bazı uygulamalarda dikkat çekici farklılıklar tespit edilmiştir. HKF+Biochar kombinasyonu, pH’yı 6.2 seviyesine düşürmüştür. Bu düşüş, biochar’ın yüzeyindeki asidik fonksiyonel grupların (karboksil, fenol) çözeltide kısa süreli asitlik oluşturmaya bağlanabilir (Lehmann ve Joseph, 2024). Diğer yandan TSP+AG ve TSP+Vermikompost uygulamalarının pH’yı 6.5 düzeyine taşıması, mikrobiyal aktiviteyi destekleyen daha nötr bir ortam oluşmasına olanak sağlamıştır. Bu durum, ortamdaki mineralizasyon sonucu ortaya çıkan organik asitlerin hızla tamponlanması ile açıklanabilir (Pramanik ve ark., 2009). Bazik topraklarda ise pH seviyeleri genel olarak 7.5–8.4 aralığında değişmiştir. Özellikle HKF+Biochar ve HKF+AG uygulamaları 8.4 ile en yüksek pH değerini vermiştir. Bu durum biocharın yüksek pH’sı ve alkalın tamponlama kapasitesinin bir sonucu olarak açıklanabilir (Lehmann ve Joseph, 2024). Fakat aynı zamanda Ca-fosfatların oluşup çökelme gerçekleşmesi ihtimalini de beraberinde getirebilir. Çünkü yüksek pH, fosforun çözünürlüğünü sınırlayan kalsiyumla birleşmesine neden olabilir (Sample ve ark., 1980). Biochar’ın yüzey alanı ve yük yoğunluğu sayesinde bu tür fosfor fiksasyonlarını kısmen azaltabileceği bazı çalışmalarda belirtilmiştir (Yao ve ark., 2012). Sonuçlar, organik materyaller ile fosforlu gübrelerin kombinasyonları, asidik koşullarda toprak pH’sını artırarak molibden gibi bitki besin maddelerinin daha alınabilir hale gelmesini sağlayabilmektedir. Bu etki, başta fosfor olmak üzere Zn, Mn gibi pH’ya

duyarlı mikrobesein elementlerinin yarıyışlılığı ağısından kritik 6nemdedir (Hinsinger, 2001). Ancak bazık koşullarda bu tür uygulamaların fosfor fiksasyonu riskini artırbileceği göz önünde bulundurularak, uygulama planlarının toprak reaksiyonuna göre optimize edilmesi gereklidir.

Çizelge 4.2. İnkübasyon topraklarının pH analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | pH     |        |        |
|------------------|--------|--------|--------|
|                  | Asidik | Nötr   | Bazık  |
| Kontrol          | 4.1 e  | 6.8 a  | 7.5 e  |
| TSP              | 4.2 de | 6.3 cd | 7.7 d  |
| TSP+Biochar      | 4.3 de | 6.4 bc | 8.1 bc |
| TSP+Vermikompost | 4.4 d  | 6.5 bc | 8.3 ab |
| TSP+AG           | 5.1 c  | 6.5 bc | 8.0 c  |
| HKF              | 5.6 a  | 6.8 a  | 8.2 bc |
| HKF+Biochar      | 5.0 c  | 6.2 d  | 8.4 a  |
| HKF+Vermikompost | 5.1 c  | 6.4 cd | 8.2 bc |
| HKF+AG           | 5.4 b  | 6.6 ab | 8.4 a  |

#### 4.1.2. Toprak EC sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak elektriksel iletkenliği (EC), çözülmüş iyonların toplam konsantrasyonunu yansıtan hem tuzluluk hem de besin elementi birikimi açısından önemli bir toprak kimyasal özelliğidir. EC, özellikle bitki kök bölgesinde iyonik dengenin sağlanmasında, iyon alımı ve osmotik stres ilişkileri bakımından oldukça önemlidir (Rhoades ve ark., 1999). Toprak inkübasyon çalışmasının EC analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler Çizelge 4.3’de verilmiştir. EC analiz sonuçlarında topraklara göre değişim katsayıları incelendiğinde, asidik toprakta, yapılan uygulamaların sonuçlarına bakıldığında tüm uygulamaların EC üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta EC değişim katsayıları TSP+AG, HKF+AG uygulamalarında orta derece değişkenlik gösterirken diğer uygulamalarda düşük derece değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Yine bazik toprakta da tüm uygulamalarda değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Asidik toprakta basıklık değeri incelendiğinde TSP+AG grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, Kontrol, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF, HKF+Biochar, HKF+AG gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP, HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir (Çizelge 4.3). Basıklık değerlerine bakıldığında nötr toprakların TSP+Biochar, ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğunu, Kontrol, TSP, TSP+AG, HKF+Vermikompost HKF+AG gruplarının normal dağılım gösterdiğini ve TSP+Vermikompost, HKF+Biochar gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğunu göstermektedir. Bazik topraklarda ise Kontrol, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF, HKF+AG gruplarında dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP grubunun normal dağılım gösterdiği ve TSP+AG, HKF+Biochar, HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir.

Asidik, nötr ve bazik toprakların çarpıklık değerleri incelendiğinde; asidik, nötr ve bazik toprakların tümünün toprak inkübasyon çalışmasında yapılan uygulamaların sonuçları EC’nin normal dağılım gösterdiğini göstermiştir.

Çizelge 4.3. İnkübasyon topraklarının EC analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | EC (µS/cm) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 120        | 400  | 460  | 48..98    | 2400    | 10.64             | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP              | 410        | 510  | 460  | 43.96     | 1933.33 | 9.55              | 0.00               | -2.07 |
|        | TSP+Biochar      | 400        | 480  | 445  | 34.15     | 1166.67 | 7.67              | -0.75              | 0.34  |
|        | TSP+Vermikompost | 400        | 490  | 430  | 42.42     | 1800    | 9.86              | 1.41               | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 770        | 860  | 830  | 40.82     | 1666.67 | 4.91              | -1.76              | 3.23  |
|        | HKF              | 590        | 820  | 712  | 97.42     | 9491.67 | 13.68             | -0.40              | -0.14 |
|        | HKF+Biochar      | 390        | 500  | 463  | 51.88     | 2691.67 | 11.21             | -1.32              | 1.03  |
|        | HKF+Vermikompost | 770        | 900  | 840  | 60.55     | 3666.67 | 7.20              | -0.27              | -3.50 |
|        | HKF+AG           | 570        | 770  | 650  | 90.92     | 8266.67 | 13.98             | 0.89               | -0.75 |
| Nötr   | Kontrol          | 440        | 540  | 490  | 41.63     | 1733.33 | 8.49              | 0.00               | 0.39  |
|        | TSP              | 390        | 530  | 470  | 60.55     | 3666.67 | 12.88             | -0.81              | 0.07  |
|        | TSP+Biochar      | 420        | 490  | 443  | 32.01     | 1025    | 7.23              | 1.87               | 3.62  |
|        | TSP+Vermikompost | 480        | 670  | 580  | 86.02     | 7400    | 14.83             | -0.22              | -2.88 |
|        | TSP+AG           | 590        | 1010 | 778  | 173.85    | 30225   | 22.36             | 0.75               | 1.68  |
|        | HKF              | 590        | 780  | 713  | 85.39     | 7291.67 | 11.98             | -1.52              | 2.24  |
|        | HKF+Biochar      | 610        | 640  | 625  | 17.32     | 300     | 2.77              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF+Vermikompost | 960        | 1130 | 1033 | 75.00     | 5625    | 7.26              | 0.75               | -0.72 |
|        | HKF+AG           | 510        | 1010 | 735  | 218.86    | 47900   | 29.77             | 0.52               | -1.19 |
| Bazik  | Kontrol          | 490        | 580  | 518  | 41.93     | 1758.3  | 8.10              | 1.92               | 3.77  |
|        | TSP              | 510        | 540  | 520  | 14.14     | 200     | 2.71              | 1.41               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 510        | 680  | 575  | 73.26     | 5366.67 | 12.74             | 1.47               | 2.69  |
|        | TSP+Vermikompost | 450        | 630  | 555  | 75.49     | 5700    | 13.60             | -1.13              | 2.23  |
|        | TSP+AG           | 770        | 980  | 870  | 93.45     | 8733.33 | 10.74             | 0.22               | -2.35 |
|        | HKF              | 670        | 800  | 720  | 55.97     | 3133.33 | 7.77              | 1.44               | 2.59  |
|        | HKF+Biochar      | 490        | 580  | 525  | 43.58     | 1900    | 8.30              | 0.68               | -2.23 |
|        | HKF+Vermikompost | 780        | 860  | 823  | 38.62     | 1491.67 | 4.69              | -0.17              | -4.41 |
|        | HKF+AG           | 640        | 730  | 665  | 43.58     | 1900    | 6.55              | 1.93               | 3.75  |

İnkübasyon denemesi topraklarının EC analiz sonuçları Duncan testi ile karşılaştırılmış ve istatistiki olarak farkların önemli olduğu belirlenmiştir ( $p<0.05$ ). Yapılan Duncan test sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.4’de verilmiştir. Buna göre asidik topraklarda uygulamaların EC üzerindeki etkileri incelendiğinde, en düşük EC değerleri kontrol (460  $\mu\text{S/cm}$ ), TSP (460  $\mu\text{S/cm}$ ), TSP+Biochar (445  $\mu\text{S/cm}$ ), TSP+Vermikompost (430  $\mu\text{S/cm}$ ) ve Öğütülmüş Fosfat+Biochar (463  $\mu\text{S/cm}$ ) uygulamalarında tespit edilmiştir. Bu düşük değerler, hem uygulanan materyalin düşük çözünürlükte olması hem de asidik koşulların iyon çözünürlüğünü sınırlamasıyla ilişkili olabilir (Lehmann ve Joseph, 2024). En yüksek EC değerleri ise TSP+AG (830  $\mu\text{S/cm}$ ) ve HKF+Vermikompost (840  $\mu\text{S/cm}$ ) uygulamalarında gözlenmiştir ( $p<0.05$ ). Bu artış ise, hem fosfor kaynaklarının mineralizasyonu sırasında açığa çıkan iyonların hem de organik materyallerin parçalanmasıyla açığa çıkan çözünür tuzların etkisiyle açıklanabilir. Özellikle vermikompost ve ahır gübresi gibi organik materyallerin mineralizasyonu sonucunda nitrifikasyon, sülfatlaşmayla sülfatın açığa çıkması ve karbonik asitin, bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) ve karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) gibi bazik anyonlara dönüşmesiyle, EC değerlerini yükseltebilir (Tejada ve González, 2005; Pramanik ve ark., 2007). Nötr toprak koşullarında en düşük EC değeri 443  $\mu\text{S/cm}$  ile TSP+Biochar uygulamasında ölçülürken, en yüksek değer 1033  $\mu\text{S/cm}$  ile HKF+Vermikompost uygulamasında kaydedilmiştir. Bu bulgular biocharın kısa vadede iyon adsorpsiyonuna neden olarak EC’yi düşürebileceğini, vermikompost gibi biyolojik olarak aktif materyallerin ise mikrobiyal ayrışmayı hızlandırarak çözünmüş tuz miktarını artırabileceğini göstermektedir (Chan ve Xu, 2009; Yin ve ark., 2017; Chen ve ark., 2022). Bazik topraklarda ise genel olarak daha yüksek EC değerleri gözlenmiş ve en yüksek ölçümler TSP+AG (870  $\mu\text{S/cm}$ ) ve HKF+Vermikompost (823  $\mu\text{S/cm}$ ) uygulamalarında gerçekleşmiştir. Organik maddece zengin materyallerin, özellikle kireçli ortamda mikrobiyal aktiviteyi teşvik ederek daha fazla anyon ve katyon salınımıyla iletkenliği artırabileceği düşünülmektedir (Masto ve ark., 2008). Sonuçlar incelendiğinde, HKF ile Biochar kombinasyonunun dikkat çekici şekilde tüm toprak gruplarında belirgin bir şekilde daha düşük EC düzeyleri verdiği görülmüştür. Bu durumun, biocharın yüzey fonksiyonel grupları sayesinde iyonları adsorplama kapasitesiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Sarkhot ve ark., 2012; Yao ve ark., 2012). Duncan testi ( $p<0.05$ ) sonuçları, hem toprak reaksiyonuna hem de uygulanan materyallere bağlı olarak EC seviyelerinde istatistiksel açıdan anlamlı farklılıklar

bulunduğunu göstermiştir. Özellikle vermikompost ve ahır gübresi katkılı uygulamalar EC'yi belirgin şekilde artırırken, biochar uygulamaları iyon adsorpsiyon etkisiyle genellikle EC'yi düşürmüştür. Bu durum, özellikle tuzluluk riski taşıyan ortamlarda biocharın dikkatli bir şekilde planlanarak uygulanması gerektiğini göstermektedir (Yin ve ark., 2017). Toprak EC'si üzerinde organik materyal ve fosforlu gübre kombinasyonları toprak pH'sına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Organik materyaller, mikrobiyal aktiviteyi artırıp çözünmüş iyon birikimini ve EC seviyelerini artırabilmektedir. Ancak biochar gibi adsorplama özelliği gösteren materyaller kısa vadede bu birikimi tamponlayabilir. Bu bulgular, sürdürülebilir toprak yönetiminde organik materyal seçiminde hem EC dengesi hem de mikrobiyal aktivite dikkate alınarak uygulama planı geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çizelge 4.4. İnkübasyon topraklarının EC ( $\mu\text{S/cm}$ ) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | EC ( $\mu\text{S/cm}$ ) |         |       |
|------------------|-------------------------|---------|-------|
|                  | Asidik                  | Nötr    | Bazik |
| Kontrol          | 460 c                   | 490 de  | 518 c |
| TSP              | 460 c                   | 470 de  | 520 c |
| TSP+Biochar      | 445 c                   | 443 e   | 575 c |
| TSP+Vermikompost | 430 c                   | 580 cde | 555 c |
| TSP+AG           | 830 a                   | 778 b   | 870 a |
| HKF              | 712 b                   | 713 bc  | 720 b |
| HKF+Biochar      | 463 c                   | 625 bcd | 525 c |
| HKF+Vermikompost | 840 a                   | 1033 a  | 823 a |
| HKF+AG           | 650 b                   | 735 bc  | 665 b |

#### 4.1.3. Toprak kireç sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprakta kireç içeriği, özellikle toprak reaksiyonu (pH), fosfor nrlğ, mikrobiyal aktivite ve bitki besin elementlerinin alınabilirliği açısından önemli bir parametredir. Kireç içeriği yüksek olan topraklar genellikle alkalın karakter (pH 7.5-8.5) gösterirken, dğk kireç içerikleri toprakların asit karakter (pH <6.5) kazanmasına neden olabilir (Havlin ve ark., 2014). Bu bağlamda, farklı fosfor kaynaklarının ve organik materyal katkılarının kireç düzeyi üzerindeki etkisinin belirlenmesi, toprak yönetimi açısından önem arz etmektedir. İnkübasyon deneme topraklarında yapılan kireç analiz sonuçlarının uygulamalara göre tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri izelge 4.5’de verilmiştir. Farklı harfler her toprak grubundaki uygulamalar arasındaki farkı ifade etmektedir. Yapılan kireç analiz sonuçlarının değişim katsayıları incelendiğinde, asidik toprakta, kontrol, TSP ve TSP+Vermikompost grupları dğk derece değişim gösterirken, TSP+Biochar, TSP+AG, HKF+Biochar orta derece değişkenlik göstermiştir. HKF, HKF+Vermikompost ve HKF+AG yüksek derece değişkenlik göstermiştir. Nötr toprak örneklerindeki kireç analiz sonuçlarına bakıldığında, sadece TSP+Biochar grubunun orta derece değişkenlik gösterdiği diğer grupların ise dğk derece değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde bazık topraklar incelendiğinde kireç analiz sonuçlarına göre uygulamaların tamamının dğk derece değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Basıklık değeri (kurtosis) ile ilgili daha önce verilen bilgilerin ışığında; kireç analizinde asidik toprağın inkübasyon çalışmasında yapılan uygulamaların sonuçları tek tek incelendiğinde TSP+AG, HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğunu, HKF grubunun normal dağılım gösterdiğini ve TSP+Biochar, HKF, HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğunu göstermektedir. Nötr toprakta yapılan uygulamaların kireç içeriği üzerine etkisi incelendiğinde kontrol, TSP+Biochar, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Vermikompost, HKF gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP, TSP+AG, HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir. Bazık toprakta ise Kontrol, TSP, TSP+AG, HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+Biochar, HKF+Vermikompost gruplarının

normal dağılım gösterdiği ve yalnızca HKF grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerine (skewness) bakıldığında, asidik toprağa yapılan uygulamaların sonucunda kirecin normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik topraktada kirecin normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.5).

İnkübasyon denemesi topraklarının kireç içerikleri Duncan testi ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.6). Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulamaları toprağın kireç içeriğinde anlamlı değişikliğe neden olmuştur ( $p<0.05$ ). Asidik topraklarda yapılan uygulamalarda kireç içeriğinin genelde düşük olduğu, ancak bazı uygulamalarla anlamlı artış olduğu görülmüştür. En yüksek kireç içeriği %0.40 ile TSP+Biochar uygulamasında saptanmış, bunu %0.36 ile HKF+Biochar ve %0.32 ile TSP+Vermikompost takip etmiştir. Bu durum, biochar uygulamasının kısa vadede bünyesinde bulunan inorganik tuzlardan karbonat içeriği nedeniyle kireç düzeyini artırabileceğini düşündürmektedir. Biochar'ın üretim sıcaklığına bağlı olarak içerdiği karbonat, toprakta geçici kireçleme etkisi yaratabilmektedir (Lehmann ve Joseph, 2024). Ayrıca biocharın yüksek yüzey alanı ve alkaline pH'sı, çözünür kalsiyum bileşiklerinin oluşumunu teşvik edebilir (Yuan ve Xu, 2011). Diğer yandan HKF+Vermikompost ve HKF+AG kombinasyonları da kireç içeriğini %0.24–0.20 düzeylerine taşıyarak anlamlı artış sağlamıştır. Bu uygulamalarda gözlemlenen etki, organik materyallerin içerdiği kalsiyum bileşikleri ve biyolojik ayrışma sonucu oluşan karbonat türlerinin katkısı ile açıklanabilir (Tejada ve González, 2005). Nötr topraklarda kireç içeriği 0.68% (Kontrol) ile 1.44% (HKF) arasında değişmiş olup, en yüksek kireç içeriği kaya fosfatı uygulaması ile elde edilmiştir. Bu durumun, ham kaya fosfatın doğal yapısında yüksek düzeyde  $\text{CaCO}_3$  bulundurmasından dolayı kaynaklanması mümkündür (Roy ve ark., 2006). HKF uygulamaları, özellikle pH 6–7 aralığında çözünürlüğünü artırarak toprak çözeltisine kalsiyum iyonu geçişi sağlayabilmekte ve böylelikle toprakta mevcut karbonatlarla tepkimeye girerek kireç içeriğini artırabilmektedir. Biochar ve organik materyal kombinasyonları bu topraklarda da dikkat çekici artış sağlamış; HKF+Vermikompost ve HKF+AG uygulamaları sırasıyla %0.89 ve %0.93 kireç düzeyine ulaşmıştır. Bu durum, organik materyallerin mineralizasyonu esnasında açığa çıkan karbonik asit ve diğer karbonat türevlerinin, toprak kalsiyumu ile etkileşime girerek geçici karbonat birikimine neden olabilmesiyle açıklanabilir (Glaser ve ark., 2002). Bazik topraklarda ise en yüksek kireç içeriği %9.68

Çizelge 4.5. İnkübasyon topraklarının kireç (%) analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak        | Uygulamalar      | Kireç (%) |      |      |           |         |                   |                    |          |
|---------------|------------------|-----------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|----------|
|               |                  | Min.      | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |          |
|               |                  |           |      |      |           |         |                   | Skewness           | Kurtosis |
| <b>Asidik</b> | Kontrol          | 0.00      | 0.00 | 0.00 | 0.00      | 0.00    | -                 | -                  | -        |
|               | TSP              | 0.16      | 0.16 | 0.16 | 0.00      | 0.00    | 0.00              | -                  | -        |
|               | TSP+Biochar      | 0.32      | 0.48 | 0.40 | 0.09      | 0.009   | 22.50             | 0.00               | -6.00    |
|               | TSP+Vermikompost | 0.32      | 0.32 | 0.32 | 0.00      | 0.00    | 0.00              | -                  | -        |
|               | TSP+AG           | 0.16      | 0.32 | 0.28 | 0.08      | 0.006   | 28.57             | -2.00              | 4.00     |
|               | HKF              | 0.00      | 0.14 | 0.08 | 0.09      | 0.009   | 112.50            | 0.00               | -6.00    |
|               | HKF+Biochar      | 0.32      | 0.48 | 0.36 | 0.08      | 0.006   | 22.22             | 2.00               | 4.00     |
|               | HKF+Vermikompost | 0.16      | 0.32 | 0.24 | 0.09      | 0.009   | 37.50             | 0.00               | -6.00    |
|               | HKF+AG           | 0.00      | 0.32 | 0.20 | 0.15      | 0.023   | 75.00             | -0.86              | -1.29    |
| <b>Nötr</b>   | Kontrol          | 0.64      | 0.80 | 0.68 | 0.08      | 0.006   | 11.76             | 2.00               | 4.00     |
|               | TSP              | 0.80      | 0.96 | 0.88 | 0.09      | 0.009   | 10.23             | 0.00               | -6.00    |
|               | TSP+Biochar      | 0.80      | 1.12 | 0.88 | 0.16      | 0.026   | 18.18             | 2.00               | 4.00     |
|               | TSP+Vermikompost | 0.80      | 1.12 | 1.0  | 0.15      | 0.023   | 15.00             | -0.86              | -1.29    |
|               | TSP+AG           | 0.80      | 0.96 | 0.88 | 0.09      | 0.009   | 10.23             | 0.00               | -6.00    |
|               | HKF              | 1.28      | 1.60 | 1.44 | 0.13      | 0.017   | 9.03              | 0.00               | 1.50     |
|               | HKF+Biochar      | 0.65      | 0.81 | 0.77 | 0.08      | 0.006   | 10.39             | -2.00              | 4.00     |
|               | HKF+Vermikompost | 0.81      | 0.98 | 0.89 | 0.10      | 0.010   | 11.24             | 0.00               | -6.00    |
|               | HKF+AG           | 0.81      | 0.98 | 0.93 | 0.09      | 0.007   | 9.68              | -2.00              | 4.00     |
| <b>Bazik</b>  | Kontrol          | 9.27      | 9.76 | 9.55 | 0.21      | 0.042   | 2.20              | -1.17              | 2.28     |
|               | TSP              | 8.95      | 9.11 | 8.99 | 0.08      | 0.006   | 0.89              | 2.00               | 4.00     |
|               | TSP+Biochar      | 9.27      | 9.60 | 9.43 | 0.13      | 0.018   | 1.38              | -0.11              | 1.51     |
|               | TSP+Vermikompost | 9.11      | 9.44 | 9.27 | 0.13      | 0.018   | 1.40              | 0.11               | 1.51     |
|               | TSP+AG           | 9.44      | 9.60 | 9.56 | 0.08      | 0.006   | 0.84              | -2.00              | 4.00     |
|               | HKF              | 9.60      | 9.76 | 9.68 | 0.09      | 0.009   | 0.93              | 0.00               | -6.00    |
|               | HKF+Biochar      | 9.27      | 9.60 | 9.39 | 0.16      | 0.025   | 1.70              | 0.81               | -1.55    |
|               | HKF+Vermikompost | 8.71      | 9.03 | 8.87 | 0.13      | 0.017   | 1.47              | 0.00               | 1.50     |
|               | HKF+AG           | 9.03      | 9.51 | 9.23 | 0.20      | 0.041   | 2.17              | 1.13               | 2.23     |

ile HKF grubunda elde edilmiştir. Kontrol grubundaki doğal yüksek kireç seviyesi (%9.55) bu toprakların tipik karakterini yansıtırken, TSP (%8.99) ve HKF+Vermikompost (%8.87) gibi bazı uygulamalarda kireç içeriğinin daha düşük kalması, bu uygulamaların mineralizasyon sürecinde çözünebilir karbonatların geçici olarakta olsa çözünmüş formda tutulmasına bağlı olabilir (Sparks, 2003). Biochar içeren uygulamaların bu pH aralığında da kireç içeriğini artırıcı etkileri göze çarpmaktadır. Özellikle HKF+Biochar (%9.40) ve TSP+Biochar (%9.44) uygulamalarında, biocharın alkalın özelliği ve karbonat katkısı sayesinde kireç düzeyinde artış gözlenmiştir (Chan Xu, 2009). Özellikle asidik ve nötr koşullarda uygulanan fosforlu gübrelerin ve organik materyallerin kireç içeriğinde anlamlı artışlar sağladığını göstermiştir. Bu bağlamda, HKF ve biochar kombinasyonunun en etkili uygulama olduğu, kireç içeriğini artırmak suretiyle toprak tamponlama kapasitesine katkı sağlamadığı söylenebilir. Bununla birlikte, bazik koşullarda kireç içeriğinin artırılması gereksiz veya zararlı olabileceğinden, bu tür uygulamaların bazik topraklarda dikkatle planlanması gerekmektedir.

Çizelge 4.6. İnkübasyon topraklarının kireç (%) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | % Kireç   |         |         |
|------------------|-----------|---------|---------|
|                  | Asidik    | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 0.00 f    | 0.68 d  | 9.55 ab |
| TSP              | 0.16 de   | 0.88 bc | 8.99 d  |
| TSP+Biochar      | 0.40 a    | 0.88 bc | 9.44 bc |
| TSP+Vermikompost | 0.32 abc  | 1.00 b  | 9.24 c  |
| TSP+AG           | 0.28 abcd | 0.88 bc | 9.56 ab |
| HKF              | 0.08 ef   | 1.44 a  | 9.68 a  |
| HKF+Biochar      | 0.36 ab   | 0.77 cd | 9.40 bc |
| HKF+Vermikompost | 0.24 bcd  | 0.90 bc | 8.87 d  |
| HKF+AG           | 0.20 cde  | 0.94 bc | 9.23 c  |

#### 4.1.4. Toprak organik madde analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak organik maddesi (OM), toprak sağlığının ve verimliliğinin temel belirleyicilerinden biri olup, hem kimyasal (besin tutma kapasitesi, pH tamponlama), hem fiziksel (agregat stabilitesi, su tutma) hem de biyolojik (mikrobiyal aktivite, enzimatik sũreçler) olayların etkinliğini doğrudan etkilemektedir (Lal, 2004; Lehmann ve Kleber, 2015). Bu bağlamda, inkũbasyon çalışmasında uygulanan farklı fosfor kaynakları ve organik materyallerinin OM ũzerine etkisi, toprak yũnetimi açasından kritik ũneme sahiptir.

İnkũbasyon topraklarının organik madde analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerler Çizelge 4.7’de verilmiştir. Organik madde analiz sonuçlarında asidik, nũtr ve bazik toprakların uygulamalara gũre sonuçları incelendiğinde yalnızca bazik toprağın TSP+Biochar uygulamasının orta derece değişkenlik gũsterdiđi, diğer tũm uygulamaların dũřũk derece değişkenlik gũsterdiđi tespit edilmiştir.

Asidik, nũtr ve bazik toprakların basıklık değerleri incelendiğinde, asidik topraklarda TSP, HKF+AG gruplarının dağılımlarının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, TSP+AG, HKF+Biochar, HKF+Vermikompost gruplarının normal dağılım gũsterdiđi ve Kontrol, HKF gruplarının ise dağılımlarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu gũrũlmektedir. Nũtr toprakların TSP, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost ve HKF+Biochar gruplarının dağılımlarının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, Kontrol, HKF+Vermikompost HKF+AG gruplarının normal dağılım gũsterdiđi ve TSP+AG, HKF gruplarının ise dağılımlarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu gũrũlmektedir. Bazik topraklarda ise TSP+AG, HKF+Vermikompost gruplarında dağılımlarının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, kontrol, TSP, HKF, HKF+Biochar gruplarının normal dağılım gũsterdiđi ve TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+AG gruplarının ise dağılımlarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu gũrũlmektedir.

Organik maddenin asidik, nũtr ve bazik topraklardaki çarpıklık değerleri incelendiğinde tũmũnũn normal dağılım gũsterdiđi gũrũlmektedir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. İnkübasyon topraklarının organik madde analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Organik Madde (%) |      |      |           |         |                   |                      |          |
|--------|------------------|-------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|----------------------|----------|
|        |                  | Min.              | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık - Basıklık |          |
|        |                  |                   |      |      |           |         |                   | Skewness             | Kurtosis |
| Asidik | Kontrol          | 2.42              | 2.90 | 2.65 | 0.21      | 0.046   | 8.08              | 0.14                 | -2.51    |
|        | TSP              | 2.72              | 2.99 | 2.89 | 0.12      | 0.014   | 4.05              | -1.57                | 2.93     |
|        | TSP+Biochar      | 2.94              | 3.33 | 3.10 | 0.16      | 0.027   | 5.29              | 0.92                 | 1.40     |
|        | TSP+Vermikompost | 2.97              | 3.52 | 3.16 | 0.25      | 0.065   | 8.04              | 1.41                 | 1.50     |
|        | TSP+AG           | 3.31              | 3.44 | 3.38 | 0.05      | 0.003   | 1.57              | -0.55                | 1.50     |
|        | HKF              | 2.45              | 2.68 | 2.59 | 0.11      | 0.012   | 4.13              | -0.54                | -2.70    |
|        | HKF+Biochar      | 2.52              | 3.05 | 2.72 | 0.23      | 0.053   | 8.42              | 1.28                 | 1.76     |
|        | HKF+Vermikompost | 3.07              | 3.38 | 3.21 | 0.13      | 0.018   | 4.14              | 0.27                 | -0.98    |
|        | HKF+AG           | 3.12              | 3.70 | 3.49 | 0.26      | 0.067   | 7.42              | -1.59                | 2.57     |
| Nötr   | Kontrol          | 2.07              | 2.38 | 2.21 | 0.14      | 0.018   | 6.11              | 0.24                 | -1.81    |
|        | TSP              | 2.73              | 3.12 | 2.98 | 0.17      | 0.030   | 5.81              | -1.74                | 3.30     |
|        | TSP+Biochar      | 2.64              | 3.02 | 2.77 | 0.17      | 0.028   | 6.03              | 1.62                 | 2.95     |
|        | TSP+Vermikompost | 2.79              | 3.06 | 2.87 | 0.13      | 0.016   | 4.39              | 1.76                 | 3.06     |
|        | TSP+AG           | 3.56              | 3.87 | 3.73 | 0.14      | 0.020   | 3.78              | -0.39                | -2.76    |
|        | HKF              | 2.59              | 2.77 | 2.67 | 0.09      | 0.008   | 3.30              | 0.13                 | -4.73    |
|        | HKF+Biochar      | 2.51              | 2.67 | 2.56 | 0.07      | 0.005   | 2.85              | 1.70                 | 2.86     |
|        | HKF+Vermikompost | 3.63              | 3.96 | 3.78 | 0.14      | 0.019   | 3.68              | 0.47                 | 0.12     |
|        | HKF+AG           | 3.51              | 3.87 | 3.71 | 0.15      | 0.023   | 4.07              | -1.00                | 1.60     |
| Bazik  | Kontrol          | 1.36              | 1.53 | 1.45 | 0.07      | 0.005   | 4.83              | -0.42                | 1.50     |
|        | TSP              | 2.14              | 2.25 | 2.20 | 0.05      | 0.002   | 2.27              | -0.54                | -0.15    |
|        | TSP+Biochar      | 1.62              | 2.23 | 1.93 | 0.33      | 0.107   | 17.10             | -0.04                | -5.76    |
|        | TSP+Vermikompost | 1.96              | 2.30 | 2.16 | 0.16      | 0.026   | 7.41              | -0.68                | -2.17    |
|        | TSP+AG           | 2.85              | 3.11 | 2.95 | 0.11      | 0.012   | 3.73              | 1.36                 | 2.54     |
|        | HKF              | 2.02              | 2.17 | 2.09 | 0.06      | 0.004   | 2.94              | 0.48                 | 1.50     |
|        | HKF+Biochar      | 1.78              | 1.91 | 1.84 | 0.06      | 0.003   | 3.26              | 0.39                 | -1.65    |
|        | HKF+Vermikompost | 2.27              | 2.33 | 2.30 | 0.03      | 0.001   | 1.30              | -1.44                | 2.24     |
|        | HKF+AG           | 2.02              | 2.60 | 2.29 | 0.28      | 0.078   | 12.23             | 0.19                 | -4.34    |

İnkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların organik madde içeriğine olan etkisini belirlemek amacıyla Duncan testi uygulanmıştır (Çizelge 4.8) ( $p<0.05$ ). Buna göre asit toprak koşullarında en yüksek organik madde içeriği %3.50 ile HKF+AG Gübresi uygulamasında kaydedilirken, en düşük değer %2.58 ile sadece HKF uygulamasında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Bu durum, organik materyallerin (özellikle ahır gübresi gibi humuslaştırıcı potansiyeli yüksek materyallerin) toprak OM havuzuna önemli katkı sağladığını göstermektedir. Organik materyallerin yüksek C/N oranı ve mikrobiyal ayrışmaya uğraması, karbon birikimini teşvik etmektedir ve fosforlu gübrelerin mikrobiyal fosfor gereksinimini karşılayarak bu süreci desteklediği söylenebilir (Cui ve ark., 2023; Chen ve ark., 2024; Ma ve ark., 2024). Nötr toprak koşullarında organik madde düzeyleri genel olarak daha yüksek seyretmiş ve en yüksek değerler %3.78 ile HKF+Vermikompost, %3.73 ile TSP+AG ve %3.72 ile HKF+AG uygulamalarında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, özellikle ahır gübresi ve vermikompost gibi biyolojik olarak aktif materyallerin mikrobiyal aktiviteyi ve karbon birikimini teşvik edici etkisini göstermektedir (Tejada ve Benítez, 2006; Pramanik ve ark., 2007). Vermikompostun topraktaki enzimatik aktiviteyi ve mikrobiyal biyokütleyi artırdığı, dolayısıyla karbon birikimini hızlandırdığı literatürde sıklıkla rapor edilmiştir (Domínguez ve Edwards, 2011). Analiz sonuçlarına göre, HKF+Biochar uygulamasında organik madde içeriğinin %2.56 ile daha düşük kalması dikkat çekmektedir. Bu durum, biocharın kısa vadede ayrışmayan, aktif olmayan (inert) karbon fraksiyonları içerdiğini ve mikrobiyal ayrışmayı yavaşlatarak OM birikimini sınırlayabileceğini göstermektedir (Lehmann ve ark., 2011). Ancak uzun vadede bu karbon formunun toprak kararlılığı açısından olumlu etkiler sağlayabileceği de bilinmektedir (Lehmann ve Joseph, 2015). Bazı topraklarda ise organik madde düzeyi genelde diğer toprak reaksiyonlarına göre düşük seyretmiş; en yüksek OM içeriği %2.95 ile TSP+AG uygulamasında gözlemlenmiştir. Bu durum, alkalın koşullarda da ahır gübresinin toprak karbonuna katkı sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, pH'nın yüksek olduğu ortamlarda mikrobiyal ayrışma hızındaki farklılıklar ve bazı karbon bileşiklerinin çözünürlüğünün değişmesi OM miktarını azaltabilmektedir (Six ve ark., 2002). Biochar içeren uygulamalarda (örneğin HKF+Biochar: %1.84), bazı ortamlarda dahi organik madde içeriğinin düşük kalması, biocharın ayrışma direnci ile ilişkilidir. Biochar uygulamalarının kısa vadede OM artışı

sağlamaktan çok, toprakta kararlı karbon fraksiyonları oluşturarak organik madde mineralizasyonunun önlenmesine katkı sağladığı bilinmektedir (Glaser ve ark., 2002). Duncan testi sonuçları, hem organik materyalin türü hem de fosfor kaynağının OM birikimi üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu göstermektedir ( $p<0.05$ ). Özellikle ahır gübresi, hem humik asit içeriği hem de ayrışabilir organik karbon (DOC) açısından OM birikimini diğer materyallere göre daha çok etkilemiştir (Tejada ve ark., 2005). Bu bulgular, sürdürülebilir toprak yönetimi için organik materyal ve fosforlu gübre kombinasyonlarının, toprak organik madde içeriğini artırmada etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle ahır gübresi ve vermikompost gibi biyolojik aktiviteyi destekleyici materyaller, fosforlu gübrelerle birlikte uygulandığında toprak organik karbon dengesini pozitif yönde etkileyebilmektedir. Ancak, biochar gibi daha az aktif yapıları materyallerin kısa vadeli katkısı sınırlı olmakla birlikte, uzun vadede kararlı OM oluşumu sağlamaktadır.

Çizelge 4.8. İnkübasyon topraklarının organik madde (%) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | % Organik Madde |         |         |
|------------------|-----------------|---------|---------|
|                  | Asidik          | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 2.65 de         | 2.22 e  | 1.45 e  |
| TSP              | 2.89 cd         | 2.99 b  | 2.20 b  |
| TSP+Biochar      | 3.11 bc         | 2.78 bc | 1.94 cd |
| TSP+Vermikompost | 3.16 bc         | 2.88 bc | 2.17 bc |
| TSP+AG           | 3.38 ab         | 3.73 a  | 2.95 a  |
| HKF              | 2.58 e          | 2.68 cd | 2.09 bc |
| HKF+Biochar      | 2.73 de         | 2.56 d  | 1.84 d  |
| HKF+Vermikompost | 3.22 ab         | 3.78 a  | 2.31 b  |
| HKF+AG           | 3.50 a          | 3.72 a  | 2.29 b  |

#### 4.1.5. Toprak inorganik N analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprakta inorganik azot ( $\text{NH}_4^+$  ve  $\text{NO}_3^-$ ), bitki büyümesini doğrudan etkileyen temel besin maddelerinden biridir. Dolayısıyla, farklı fosfor kaynaklarının ve organik materyallerin azot mineralizasyonu üzerindeki etkilerinin anlaşılması, sürdürülebilir tarım uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır (Sylvia ve ark., 2005). Bu çalışmanın bu kısmında, azotun toprak pH'sına (asidik, nötr, bazik) bağlı olarak farklı uygulamalar altında nasıl değiştiği detaylı biçimde ortaya konmuştur.

İnkübasyon denemesi topraklarının azot içeriği değerlerinde değişim katsayıları incelendiğinde; asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde de değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.9).

Çarpıklık değeri (skewness) incelendiğinde ise  $\pm 2$  saçılımının çoğu istatistikçi tarafından normal varsayılmasından dolayı asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde de belirlenen N değerlerinin normal dağılım gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) incelendiğinde asidik topraklarda dağılımın normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu uygulamaların kontrol, TSP, TSP+Vermikompost olduğu görülürken, HKF ve HKF +AG uygulamalarının ise normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr topraklarda TSP + Vermikompost, HKF ve HKF +AG uygulamalarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen dağılım gösterdiği, yalnızca HKF +Biochar uygulamasının normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik topraklarda ise TSP+AG ve normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği görülmektedir. Uygulamalarının normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

İnkübasyon denemesinin toprak N analiz sonuçlarının yapılan uygulamalara göre önem durumu Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p < 0.05$ ). Yapılan Duncan test sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Buna göre asidik toprak koşullarında en yüksek azot içeriği %0.089 ile HKF grubunda tespit edilmiş. Kontrol grubundaki azot seviyesi (%0.053) en düşük düzeyde kalmıştır ( $p < 0.05$ ).

Çizelge 4.9. İnkübasyon topraklarının azot analizi sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | % N  |      |       |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------|------|-------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min. | Max. | Ort.  | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 0.05 | 0.06 | 0.053 | 0.003     | 0.00    | 5.66              | 0                  | -5.21 |
|        | TSP              | 0.05 | 0.05 | 0.05  | 0.002     | 0.00    | 4.00              | 0                  | -6.0  |
|        | TSP+Biochar      | 0.08 | 0.09 | 0.081 | 0.004     | 0.00    | 4.94              | 0                  | -0.43 |
|        | TSP+Vermikompost | 0.06 | 0.06 | 0.059 | 0.003     | 0.00    | 5.08              | 0.17               | -4.40 |
|        | TSP+AG           | 0.07 | 0.08 | 0.075 | 0.001     | 0.00    | 1.33              | -0.85              | -1.29 |
|        | HKF              | 0.09 | 0.09 | 0.089 | 0.003     | 0.00    | 3.37              | -1.60              | 2.70  |
|        | HKF+Biochar      | 0.07 | 0.08 | 0.076 | 0.006     | 0.00    | 7.89              | -0.42              | 1.50  |
|        | HKF+Vermikompost | 0.06 | 0.07 | 0.064 | 0.005     | 0.00    | 7.81              | -1.17              | 1.09  |
|        | HKF+AG           | 0.08 | 0.09 | 0.082 | 0.004     | 0.00    | 4.88              | -1.50              | 2.64  |
| Nötr   | Kontrol          | 0.04 | 0.05 | 0.047 | 0.004     | 0.00    | 8.51              | -1.37              | 1.50  |
|        | TSP              | 0.04 | 0.05 | 0.047 | 0.003     | 0.00    | 6.38              | -1.33              | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 0.03 | 0.03 | 0.031 | 0.003     | 0.00    | 9.68              | -1.33              | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.03 | 0.04 | 0.038 | 0.003     | 0.00    | 7.89              | -0.37              | -3.90 |
|        | TSP+AG           | 0.07 | 0.08 | 0.073 | 0.005     | 0.00    | 6.85              | 1.03               | -0.21 |
|        | HKF              | 0.07 | 0.08 | 0.075 | 0.001     | 0.00    | 1.33              | 0.37               | -3.90 |
|        | HKF+Biochar      | 0.06 | 0.07 | 0.067 | 0.002     | 0.00    | 2.99              | -1.44              | 2.24  |
|        | HKF+Vermikompost | 0.05 | 0.06 | 0.057 | 0.004     | 0.00    | 7.02              | 0.65               | 0.71  |
|        | HKF+AG           | 0.07 | 0.09 | 0.079 | 0.006     | 0.00    | 7.59              | -0.44              | -3.31 |
| Bazik  | Kontrol          | 0.04 | 0.05 | 0.043 | 0.002     | 0.00    | 4.65              | 1.19               | 0.44  |
|        | TSP              | 0.08 | 0.09 | 0.082 | 0.006     | 0.00    | 7.32              | 0.63               | -1.70 |
|        | TSP+Biochar      | 0.07 | 0.09 | 0.076 | 0.007     | 0.00    | 9.21              | 0.67               | -1.68 |
|        | TSP+Vermikompost | 0.06 | 0.08 | 0.070 | 0.005     | 0.00    | 7.14              | 0.27               | 0.87  |
|        | TSP+AG           | 0.08 | 0.09 | 0.085 | 0.006     | 0.00    | 7.06              | -1.60              | 2.70  |
|        | HKF              | 0.05 | 0.06 | 0.052 | 0.006     | 0.00    | 11.54             | 1.52               | 2.76  |
|        | HKF+Biochar      | 0.03 | 0.04 | 0.037 | 0.004     | 0.00    | 10.81             | -1.09              | 0.30  |
|        | HKF+Vermikompost | 0.09 | 0.09 | 0.087 | 0.001     | 0.00    | 1.15              | 0                  | -1.20 |
|        | HKF+AG           | 0.05 | 0.06 | 0.056 | 0.003     | 0.00    | 5.36              | 0.63               | -1.70 |

Bu sonuç, HKF'nin asidik koşullarda çözünürlüğünün artarak mikrobiyal aktiviteyi ve mineralizasyonu teşvik etmesiyle ilişkilendirilebilir (Oberson ve Joner, 2005). Biocharın azot üzerindeki etkisi literatürde tartışmalı olmakla birlikte, özellikle düşük C/N oranına sahip organik materyallerle birlikte kullanıldığında, azotun sabitlenmesini sınırlayarak toprakta mineral N seviyesini artırabileceği belirtilmektedir (Lehmann ve ark., 2003; Bruun ve ark., 2012). Bununla birlikte, uzun vadede biocharın azot adsorpsiyonu yoluyla mineral azotu geçici olarak immobilize edebileceği de rapor edilmiştir (Taghizadeh-Toosi ve ark., 2011). Nötr topraklarda en yüksek inorganik N düzeyleri %0.079 (HKF+AG), %0.075 (HKF) ve %0.073 (TSP+AG) uygulamalarında gözlenmiştir. En düşük değer ise %0.031 ile TSP+Biochar uygulamasında kaydedilmiştir. Bu düşüş, biocharın nötr pH'da azotu bağlama kapasitesinin daha yüksek olabileceğini ve kısa süreliğine olsa N immobilizasyonuna neden olabileceğini göstermektedir (Lehmann ve Joseph, 2024). Organik materyallerin kullanıldığı uygulamalarda özellikle ahır gübresi ve vermikompostun mikrobiyal aktiviteyi teşvik ederek azot mineralizasyonunu artırdığı bilinmektedir (Bernal ve ark., 2009). Yapılan bu çalışmadaki bulgular da bu görüşü desteklemekte, ahır gübresinin hem tek başına hem de fosfor kaynakları ile birlikte uygulandığında toprakta inorganik azot seviyelerini önemli ölçüde artırabildiğini göstermektedir. Bazı topraklarda ise en yüksek azot içeriği %0.087 ile HKF+Vermikompost ve %0.085 ile TSP+AG uygulamalarında belirlenmiştir (Çizelge 4.10). Bu durumun, vermikompost ve ahır gübresinin bazı ortamlarda dahi mikrobiyal ayrışma süreçlerini etkiliyor olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bunun sonucunda da mineral N fraksiyonunun arttığını söylemek mümkündür (Domínguez ve Edwards, 2011). Elde edilen bulgular arasında bir diğer dikkat çekici unsur ise, HKF+Biochar kombinasyonunun %0.037 ile en düşük azot düzeyine sahip olmasıdır. Bu durumun nedeni, biocharın bazı ortamlarda amonyum iyonlarını adsorbe etme eğilimiyle açıklanabilir (Sarkhot ve ark., 2013). Tüm bunların dışında, pH'nın yüksek olduğu koşullarda nitrifikasyon hızlarının artması nedeniyle, nitratın yıkanma yoluyla kaybı söz konusu olabilmektedir (Keeney ve Hatfield, 2001).

Çizelge 4.10: İnkübasyon topraklarının azot (%) analizi sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | % N      |         |          |
|------------------|----------|---------|----------|
|                  | Asidik   | Nötr    | Bazik    |
| Kontrol          | 0.053 e  | 0.047 d | 0.043 e  |
| TSP              | 0.05 e   | 0.047 d | 0.082 ab |
| TSP+Biochar      | 0.081 bc | 0.031 f | 0.076 bc |
| TSP+Vermikompost | 0.059 d  | 0.038 e | 0.070 c  |
| TSP+AG           | 0.075 c  | 0.073 a | 0.085 a  |
| HKF              | 0.089 a  | 0.075 a | 0.052 d  |
| HKF+Biochar      | 0.076 bc | 0.067 b | 0.037 e  |
| HKF+Vermikompost | 0.064 d  | 0.057 c | 0.087 a  |
| HKF+AG           | 0.082 b  | 0.079 a | 0.056 d  |

#### 4.1.6. Toprak toplam P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının toplam P analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.11’de verilmiştir. Toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın toplam fosfor üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik topraklarında düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta Kontrol grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP+AG ve Ögt. Fosfat+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Biochar grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise TSP+Biochar, HKF+Biochar, HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Vermikompost, TSP+AG ve HKF gruplarının normal dağılım gösterdiği ve Kontrol, TSP, HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre toplam fosforda normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprağın uygulamalarının sonuçları incelendiğinde de toplam fosforun normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.11). İnkübasyon denemesi toplam P analiz sonuçları yapılan uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p<0.05$ ). Yapılan Duncan testi sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.12’de verilmiştir. Farklı harfler aynı toprak grubunda uygulamaların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir. Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki toplam fosforda anlamlı değişime neden olmuştur. Asit toprak koşullarında en yüksek toplam P değeri, TSP ile ahır gübresinin birlikte uygulanması sonucu 836 mg/kg düzeyinde ölçülmüştür. Bu durum, organik madde içeriği yüksek materyallerin fosfor tutulumunu arttırıcı etkisine işaret etmektedir. Organik materyaller, fosforu hem doğrudan mineral formda sunmakta hem de mikrobiyal aktiviteyi uyarak fosfor mineralizasyonunu hızlandırmaktadır (Zhang ve ark., 2020; Dotaniya ve ark., 2023).

Çizelge 4.11. İnkübasyon topraklarının toplam P (mg/kg) analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Toplam P (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.             | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 401              | 409  | 404  | 3.33      | 11.11   | 0.82              | 0.99               | 2.01  |
|        | TSP              | 400              | 428  | 413  | 11.76     | 136.43  | 2.85              | 0.71               | 0.73  |
|        | TSP+Biochar      | 377              | 492  | 444  | 48.71     | 2373.1  | 10.97             | -1.07              | 1.84  |
|        | TSP+Vermikompost | 413              | 494  | 447  | 33.95     | 1152.73 | 7.60              | 1.00               | 1.75  |
|        | TSP+AG           | 748              | 912  | 836  | 68.15     | 4644.81 | 8.15              | -0.52              | 0.97  |
|        | HKF              | 555              | 576  | 567  | 9.68      | 93.76   | 1.71              | -0.79              | -1.23 |
|        | HKF+Biochar      | 571              | 580  | 576  | 4.04      | 16.33   | 0.70              | -1.09              | 0.29  |
|        | HKF+Vermikompost | 691              | 719  | 706  | 11.48     | 131.96  | 1.63              | -0.35              | 0.38  |
|        | HKF+AG           | 703              | 732  | 716  | 12.44     | 155     | 1.74              | 0.39               | -0.73 |
| Nötr   | Kontrol          | 570              | 585  | 578  | 6.41      | 41.03   | 1.11              | -0.59              | -1.50 |
|        | TSP              | 613              | 639  | 624  | 10.59     | 112.06  | 1.70              | 0.94               | 1.99  |
|        | TSP+Biochar      | 658              | 680  | 668  | 10.38     | 107.67  | 1.55              | 0.46               | -3.11 |
|        | TSP+Vermikompost | 674              | 689  | 680  | 6.93      | 47.95   | 1.02              | 0.69               | -1.17 |
|        | TSP+AG           | 872              | 893  | 880  | 9.11      | 82.94   | 1.04              | 1.70               | 3.11  |
|        | HKF              | 764              | 776  | 771  | 5.17      | 26.70   | 0.67              | -0.59              | 0.33  |
|        | HKF+Biochar      | 815              | 859  | 843  | 19.02     | 361.79  | 2.26              | -1.52              | 2.81  |
|        | HKF+Vermikompost | 920              | 953  | 939  | 13.92     | 194.00  | 1.48              | -0.98              | 1.50  |
|        | HKF+AG           | 983              | 989  | 987  | 2.65      | 7.00    | 0.27              | -0.86              | -0.28 |
| Bazik  | Kontrol          | 323              | 328  | 325  | 2.19      | 4.78    | 0.67              | 1.50               | 2.81  |
|        | TSP              | 344              | 349  | 346  | 2.22      | 4.91    | 0.64              | 1.79               | 3.19  |
|        | TSP+Biochar      | 350              | 355  | 353  | 2.25      | 5.08    | 0.64              | 0.25               | -2.27 |
|        | TSP+Vermikompost | 358              | 364  | 361  | 2.24      | 5.02    | 0.62              | 0.79               | 1.82  |
|        | TSP+AG           | 436              | 460  | 446  | 11.01     | 121.30  | 2.47              | 0.83               | -0.76 |
|        | HKF              | 406              | 434  | 419  | 12.09     | 146.05  | 2.89              | 0.61               | -0.86 |
|        | HKF+Biochar      | 419              | 432  | 425  | 6.29      | 39.58   | 1.48              | 0.32               | -3.98 |
|        | HKF+Vermikompost | 439              | 448  | 442  | 4.08      | 16.67   | 0.92              | 1.76               | 3.23  |
|        | HKF+AG           | 455              | 493  | 473  | 19.57     | 382.92  | 4.14              | 0.10               | -5.32 |

Ayrıca, ahır gübresi uygulamalarında görülen bu artış, humik maddelerin metal iyonlarıyla oluşturduğu kompleksler yoluyla fosforun fiksasyonunu önlemesiyle de açıklanabilir (Busato ve ark., 2016). Nötr topraklarda da benzer şekilde, HKF+AG uygulaması en yüksek toplam P değerini (986 mg/kg) vermiştir. Elde edilen bu sonuç, organik materyallerin, düşük çözünürlüklü fosfat kaynaklarının biyolojik solubilizasyonunu yani çözünürlüğünü artırabildiğini göstermektedir. Özellikle nötr pH koşullarında fosfat çözücü mikroorganizmaların (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Burkholderia*) aktivitesinin daha yüksek olduğu bilinmektedir (Pramanik ve ark., 2009; Menezes-Blackburn ve ark., 2018). Organik materyallerin mikrobiyal yaşamı desteklemesi, *phoD* geni taşıyan bakterilerin yani fosfor çözücü bakterilerin popülasyonunu artırarak alkaline fosfataz aktivitesi üzerinden organik fosforun mineralizasyonunu teşvik edebilir (Busato ve ark., 2017; Lu ve ark., 2023). Bazı topraklarda ise toplam fosfor düzeyi genel olarak düşük kalmakla birlikte, HKF+AG uygulaması ile 472 mg/kg'a ulaşılmıştır. Bu durum, bazı koşullarda genellikle Ca-P bağlarının etkin olmasından kaynaklı fosforun bitkilerce alınabilir formda tutulmasının zorlaştığını ancak organik asitlerce zengin ahır gübresi uygulamalarının bu etkiyi azaltabileceğini göstermektedir. Nitekim organik asitlerin Ca-fosfat çözünürlüğünü artırdığı daha önceki çalışmalarda da belirtilmiştir (Guppy ve ark., 2005; Hossain ve ark., 2024).

Duncan testi sonuçları, özellikle ahır gübresi ile birlikte uygulanan fosfor kaynaklarının her üç toprak reaksiyonunda da anlamlı artışlar sağladığını göstermektedir ( $p < 0.05$ ). Bununla birlikte, TSP'nin yalnız başına ya da biochar veya vermikompost ile kombinasyonlarının, çoğu durumda kontrol grubuyla istatistiksel olarak benzer gruplarda yer alması, bu materyallerin fosfor artışı üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Biocharın pH'yı yükseltici etkisi ve fosforu adsorbe etme kapasitesi, bazı durumlarda fosforun çözünürlüğünü azaltabilmektedir (Gul ve ark., 2015; Becagli ve ark., 2022). Toprakların fosfor fraksiyonları dikkate alındığında, vermikompost gibi yüksek mikrobiyal aktiviteye sahip organik materyallerin, özellikle alkali fosfataz enzim aktivitesini artırarak organik fosforun inorganik forma dönüşümünü hızlandırdığı rapor edilmiştir (Przemieniecki ve ark., 2021). Bu bağlamda, çalışmamızda HKF+Vermikompost kombinasyonunun bazı toprakta 442 mg/kg'lık toplam fosfor değeri sağlaması, bu enzimatik dönüşümlerin potansiyel katkısını göstermektedir.

Sonuç olarak, hem fosforun formu hem de uygulanan organik materyalin türü (ahır gübresi, vermikompost, biochar) ve toprak reaksiyonu, toplam fosfor düzeyleri üzerinde önemli ölçüde etkili olmaktadır. Fosforlu gübrelerin özellikle ahır gübresi gibi kompleks organik materyallerle birlikte uygulanması, her üç toprak koşulunda da toplam fosfor düzeylerini artırıcı yönde etkili olmuştur.

Çizelge 4.12. İnkübasyon topraklarının toplam P (mg/kg) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | Toplam P (mg/kg) |          |           |
|------------------|------------------|----------|-----------|
|                  | Asidik           | Nötr     | Bazik     |
| Kontrol          | 404.43 d         | 578.41 h | 324.46 f  |
| TSP              | 413.05 d         | 624.29 g | 345.87 e  |
| TSP+Biochar      | 444.36 d         | 667.50 f | 352.49 de |
| TSP+Vermikompost | 447.97 d         | 680.11 f | 360.82 d  |
| TSP+AG           | 836.41 a         | 879.55 c | 445.86 b  |
| HKF              | 567.56 c         | 770.55 e | 418.57 c  |
| HKF+Biochar      | 576.50 c         | 842.47 d | 424.75 c  |
| HKF+Vermikompost | 706.02 b         | 939.00 b | 442.00 b  |
| HKF+AG           | 716.50 b         | 986.50 a | 472.75 a  |

#### 4.1.7. Toprak inorganik P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının inorganik fosfor analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.13’de verilmiştir. İnkübasyon çalışmasında inorganik fosfor değerlerinin değişkenlikleri incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik topraklarda inorganik fosfor üzerindeki değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta HKF+Vermikompost grubunun normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Vermikompost ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu ve diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise Kontrol ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+AG ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise yalnızca TSP+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm uygulama gruplarının ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre inorganik fosforda normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprak uygulamalarının sonuçları incelendiğinde de inorganik fosforun normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.13).

İnkübasyon denemesi inorganik fosfor analiz sonuçları yapılan uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılarak Çizelge 4.14’te verilmiştir ( $p<0.05$ ). Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki inorganik fosforda anlamlı değişime neden olmuştur. Asidik topraklarda, inorganik fosfor düzeylerinin 18 mg/kg (Kontrol) ile 114 mg/kg (HKF+Vermikompost) arasında değiştiği görülmüştür. Özellikle HKF+Vermikompost uygulaması, inorganik fosfor değerinde önemli bir artış sağlamıştır ( $p<0.05$ ). Bu durum, vermikompostun fosfor mobilizasyonundaki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. *Eisenia foetida* (Kırmızı Kaliforniya Solucanı) gibi türlerin sindirim sistemlerindeki fosfatları serbest bırakabilecek fosfatazlar ve organik asitler

Çizelge 4.13. İnkübasyon topraklarının inorganik P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | İnorganik P (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|---------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.                | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 16                  | 19   | 18   | 1.26      | 1.59    | 7.00              | -1.29              | 1.32  |
|        | TSP              | 27                  | 27   | 27   | 0.20      | 0.04    | 0.74              | -0.56              | 0.92  |
|        | TSP+Biochar      | 22                  | 26   | 24   | 1.56      | 2.43    | 6.50              | -1.16              | 1.77  |
|        | TSP+Vermikompost | 30                  | 33   | 32   | 1.18      | 1.40    | 3.69              | -1.65              | 3.10  |
|        | TSP+AG           | 109                 | 111  | 111  | 0.76      | 0.59    | 0.68              | -1.44              | 1.70  |
|        | HKF              | 59                  | 63   | 62   | 1.96      | 3.85    | 3.16              | -1.58              | 2.74  |
|        | HKF+Biochar      | 25                  | 28   | 27   | 0.98      | 0.97    | 3.63              | -1.01              | 0.14  |
|        | HKF+Vermikompost | 110                 | 116  | 114  | 2.93      | 8.62    | 2.57              | -0.47              | -2.72 |
|        | HKF+AG           | 38                  | 46   | 42   | 3.47      | 12.07   | 8.26              | -0.68              | 0.83  |
| Nötr   | Kontrol          | 7                   | 7    | 7    | 0.09      | 0.01    | 1.29              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP              | 19                  | 26   | 23   | 2.77      | 7.67    | 12.04             | -0.19              | 0.04  |
|        | TSP+Biochar      | 9                   | 11   | 10   | 0.75      | 0.56    | 7.50              | 0.99               | 0.97  |
|        | TSP+Vermikompost | 28                  | 31   | 29   | 0.99      | 0.99    | 3.41              | 0.74               | 0.34  |
|        | TSP+AG           | 109                 | 110  | 110  | 0.22      | 0.05    | 0.20              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF              | 73                  | 81   | 77   | 3.07      | 9.44    | 3.99              | -0.44              | 0.68  |
|        | HKF+Biochar      | 15                  | 16   | 15   | 0.46      | 0.22    | 3.07              | 0.00               | -4.41 |
|        | HKF+Vermikompost | 95                  | 104  | 98   | 4.21      | 17.73   | 4.30              | 1.85               | 3.56  |
|        | HKF+AG           | 55                  | 61   | 59   | 2.47      | 6.12    | 4.19              | -1.39              | 1.50  |
| Bazik  | Kontrol          | 25                  | 28   | 26   | 1.53      | 2.33    | 5.88              | 0.99               | -0.47 |
|        | TSP              | 35                  | 40   | 37   | 1.92      | 3.70    | 5.19              | -0.44              | 1.17  |
|        | TSP+Biochar      | 26                  | 27   | 26   | 0.60      | 0.36    | 2.31              | -1.12              | 0.69  |
|        | TSP+Vermikompost | 41                  | 43   | 42   | 0.78      | 0.61    | 1.86              | -1.47              | 2.02  |
|        | TSP+AG           | 108                 | 115  | 110  | 3.18      | 10.08   | 2.89              | 0.79               | -1.16 |
|        | HKF              | 72                  | 78   | 75   | 2.75      | 7.55    | 3.67              | -0.44              | -0.61 |
|        | HKF+Biochar      | 30                  | 32   | 31   | 0.99      | 0.99    | 3.19              | 0.00               | -1.24 |
|        | HKF+Vermikompost | 86                  | 109  | 99   | 9.25      | 85.58   | 9.34              | -0.79              | 1.68  |
|        | HKF+AG           | 62                  | 64   | 63   | 0.95      | 0.91    | 1.51              | -1.77              | 3.38  |

vermikompost sayesinde fosforun çözünürlüğünü arttırmaktadır (Domínguez ve Edwards, 2011). Ayrıca vermikompostların mikrobiyal aktiviteyi artırarak fosfor mineralizasyonunu hızlandırdığı da birçok çalışmada vurgulanmıştır (Busato ve ark., 2017; Lu ve ark., 2023). Nötr topraklarda ise en yüksek inorganik fosfor düzeyine TSP+AG uygulaması ile ulaşılmıştır (109 mg/kg). Bu sonuç, fosforun çözünürlüğünün nötr pH'da optimal seviyede olmasının yanı sıra, ahır gübresinin toprakta mikrobiyal yaşamı destekleyerek fosfat çözünürlüğünü artırıcı etkisine bağlanabilir (Saha ve ark., 2008; Przemieniecki ve ark., 2021). Organik materyallerin sağladığı humik ve fulvik asitlerin, fosforun Ca ile sabitlenmesini önleyerek fosforun kullanılabilirliğini artırdığı belirtilmektedir (Tejada ve González, 2007). Bazı topraklarda ise fosforun kalsiyumla birleşerek çözünmez Ca-fosfat bileşikler oluşturma eğilimi, inorganik fosfor düzeylerini sınırlandırmaktadır. Ancak TSP+AG uygulamasının burada da 110 mg/kg gibi yüksek bir düzeye ulaşması, organik maddenin dar bir çevrede sağladığı asidik özellik etkisiyle bu sorunu kısmen çözebildiğini göstermektedir (Guppy ve ark., 2005; Song ve ark., 2017). Organik asitlerin Ca ile bağlı fosfatların çözünürlüğünü artırma kapasitesi, bu sonucu destekleyen temel mekanizmadır. Biochar uygulamalarının inorganik fosfor düzeylerini diğer uygulamalara göre önemli ölçüde düşürmüş olması dikkat çekmektedir. Örneğin, asidik toprakta TSP+Biochar uygulaması yalnızca 24.89 mg/kg değerine ulaşabilmiştir. Biocharın yüzeyinde bulunan fonksiyonel grupların fosfatları adsorbe etmesiyle ilişkilendirilmektedir (Lehmann, 2007; Sarkhot ve ark., 2013). Özellikle yüksek pH değerine sahip biocharlar, fosfat iyonlarının aktif yüzeylerce tutulmasına neden olarak fosforun toprak çözeltisine geçişini sınırlandırabilir (Zhang ve ark., 2016; Yin ve ark., 2017; Chen ve ark., 2022). Dolayısıyla biocharın fosforlu gübrelerin verimliliğini azaltıcı etkisi, uygun doz ve uygulama şekli belirlenmeden kullanılmasının risklerini ortaya koymaktadır.

Ayrıca, istatistiksel analizler farklı toprak reaksiyonlarında benzer eğilimleri ortaya koymuştur. Hem asidik hem nötr hem de bazı topraklarda, TSP+AG ve Ögt. Fosfat+Vermikompost uygulamaları, inorganik fosfor içeriğini anlamlı düzeyde artıran gruplar arasında yer almıştır ( $p<0.05$ ). Fosfor kaynaklarının organik materyallerle birlikte uygulanmasının, tek başına uygulamaya göre daha etkili olduğunu göstermektedir. Kombine uygulamalarda mikrobiyal aktivitenin artması, fosfat çözücü bakterilerin desteklenmesi (*Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp.) ve fosfataz aktivitesinin yükselmesi

gibi mekanizmalar bu etkiyi açıklamaktadır (Abd-Alla, 1994; Menezes-Blackburn ve ark., 2018).

Sonuç olarak, fosforun topraktaki yararlılığını yalnızca kaynağına değil, aynı zamanda organik materyallerle birlikte verilme şekline, toprak reaksiyonuna ve mikrobiyal aktivitenin derecesine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle organik katkıların (ahır gübresi, vermikompost) TSP ya da kaya fosfatı gibi farklı fosfor kaynaklarıyla birlikte uygulanması, fosforun inorganik forma dönüşümünü ve alınabilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Çizelge 4.14. İnkübasyon topraklarının inorganik fosfor (mg/kg) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | İnorganik P (mg/kg) |          |          |
|------------------|---------------------|----------|----------|
|                  | Asidik              | Nötr     | Bazik    |
| Kontrol          | 18.21 g             | 6.74 h   | 25.90 f  |
| TSP              | 27.35 f             | 22.80 f  | 37.39 e  |
| TSP+Biochar      | 24.89 f             | 9.65 h   | 26.43 f  |
| TSP+Vermikompost | 32.16 e             | 29.34 e  | 42.24 e  |
| TSP+AG           | 111.05 b            | 109.61 a | 110.43 a |
| HKF              | 62.03 c             | 77.07 c  | 75.42 c  |
| HKF+Biochar      | 27.31 f             | 15.04 g  | 31.04 f  |
| HKF+Vermikompost | 114.01 a            | 97.83 b  | 98.75 b  |
| HKF+AG           | 42.94 d             | 58.78 d  | 62.90 d  |

#### 4.1.8. Toprak organik P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının toplam fosfor analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.15’de verilmiştir. Bulgular, hem organik materyal niteliği hem de toprak pH’sının fosfor dönüşümü süreçlerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.15’deki veriler incelendiğinde inkübasyon çalışmasında organik fosforun, asidik, nötr ve bazik topraklarda yapılan uygulamalara göre değişkenlik katsayısı incelendiğinde düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta tüm uygulama gruplarının dağılımının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP, TSP+AG, HKF+Biochar, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Biochar grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise Kontrol, TSP+Biochar, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP, TSP+AG ve HKF gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP+Vermikompost, HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik nötr ve bazik toprakların inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre inorganik fosforun normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.15).

İnkübasyon denemesi organik P analiz sonuçları yapılan uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılmış ve elde edilen veriler Çizelge 4.16’da verilmiştir. Farklı harfler aynı toprak grubunda uygulamaların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir. Yapılan uygulamaların topraktaki organik fosforda anlamlı değişime neden olduğu gözlenmiştir. Asidik toprakta organik fosfor düzeyinin 386 mg/kg (Kontrol) ile 725 mg/kg (TSP+AG) arasında değiştiği görülmektedir. Özellikle TSP+AG uygulaması, organik fosfor miktarında anlamlı bir artış sağlamıştır ( $p<0.05$ ). Bu artış, ahır gübresinin içerdiği yüksek düzeyde organik madde ve mikrobiyal biyoaktiviteyi desteklemesiyle ilişkilendirilebilir. Organik materyaller, toprakta fosfat esterleri formundaki organik fosfor birikimini teşvik ederek organik fosfor havuzunu artırabilir (Turner ve Haygarth, 2005). Ayrıca, ahır gübresinde bulunan karbon kaynaklarının mikroorganizmalar için

Çizelge 4.15. İnkübasyon topraklarının organik fosfor analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Organik P (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|-------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.              | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 381               | 390  | 386  | 3.49      | 12.24   | 0.90              | -0.51              | 0.84  |
|        | TSP              | 373               | 401  | 385  | 11.94     | 142.75  | 3.10              | 0.71               | 0.79  |
|        | TSP+Biochar      | 354               | 466  | 419  | 47.24     | 2228.54 | 11.27             | -1.06              | 1.78  |
|        | TSP+Vermikompost | 383               | 461  | 415  | 32.97     | 1087.35 | 7.94              | 1.09               | 1.85  |
|        | TSP+AG           | 638               | 800  | 725  | 67.48     | 4553.92 | 9.31              | -0.50              | 0.92  |
|        | HKF              | 492               | 517  | 505  | 11.08     | 122.81  | 2.19              | 0.36               | -1.98 |
|        | HKF+Biochar      | 543               | 554  | 549  | 4.80      | 23.06   | 0.87              | -0.58              | -1.20 |
|        | HKF+Vermikompost | 581               | 602  | 592  | 8.69      | 75.55   | 1.47              | -0.23              | 1.09  |
|        | HKF+AG           | 658               | 693  | 673  | 14.67     | 215.44  | 2.18              | 1.00               | 1.58  |
| Nötr   | Kontrol          | 564               | 578  | 572  | 6.39      | 40.79   | 1.12              | -0.63              | -1.28 |
|        | TSP              | 594               | 613  | 602  | 8.03      | 64.45   | 1.33              | 1.24               | 2.13  |
|        | TSP+Biochar      | 649               | 669  | 658  | 9.66      | 93.26   | 1.47              | 0.41               | -3.42 |
|        | TSP+Vermikompost | 645               | 660  | 651  | 7.10      | 50.36   | 1.09              | 0.88               | -1.11 |
|        | TSP+AG           | 763               | 784  | 770  | 9.20      | 84.64   | 1.19              | 1.75               | 3.24  |
|        | HKF              | 686               | 699  | 694  | 5.70      | 32.52   | 0.82              | -0.80              | 1.02  |
|        | HKF+Biochar      | 800               | 845  | 827  | 18.95     | 359.28  | 2.29              | -1.43              | 2.64  |
|        | HKF+Vermikompost | 825               | 849  | 841  | 10.98     | 120.50  | 1.31              | -1.70              | 2.84  |
|        | HKF+AG           | 924               | 934  | 928  | 4.18      | 17.51   | 0.45              | 1.49               | 2.32  |
| Bazik  | Kontrol          | 298               | 300  | 299  | 1.02      | 1.05    | 0.34              | 0.17               | -5.01 |
|        | TSP              | 307               | 310  | 308  | 1.31      | 1.73    | 0.43              | -0.85              | -1.29 |
|        | TSP+Biochar      | 325               | 328  | 326  | 1.70      | 2.92    | 0.52              | 0.60               | -2.15 |
|        | TSP+Vermikompost | 317               | 321  | 319  | 1.75      | 3.07    | 0.55              | 1.77               | 3.25  |
|        | TSP+AG           | 328               | 346  | 335  | 7.84      | 61.52   | 2.34              | 0.84               | -0.59 |
|        | HKF              | 328               | 362  | 343  | 14.41     | 207.61  | 4.20              | 0.68               | 0.53  |
|        | HKF+Biochar      | 389               | 401  | 394  | 6.06      | 36.74   | 1.54              | 0.66               | -2.22 |
|        | HKF+Vermikompost | 338               | 355  | 343  | 7.69      | 59.18   | 2.24              | 1.87               | 3.57  |
|        | HKF+AG           | 392               | 430  | 410  | 19.03     | 362.11  | 4.64              | 0.09               | -5.08 |

enerji temini sağlayarak mikrobiyal biyokütleyi ve enzim aktivitesini teşvik ettiği bilinmektedir (Pramanik ve ark., 2009; Przemieniecki ve ark., 2021). Nötr topraklarda ise en yüksek organik fosfor değeri 927 mg/kg ile HKF+AG uygulamasında gözlenmiştir. Bu durum, düşük çözünürlüklü kaya fosfatın mikrobiyal faaliyet ve organik asit üretimi sayesinde daha aktif hale gelerek organik fosfor dönüşümüne katkı sağladığını göstermektedir. Bu tür kombinasyonlar, özellikle *Pseudomonas*, *Burkholderia* gibi fosfat çözücü bakterilerin organik fosfor esterlerini hidrolize eden fosfataz enzimleri üretmesi sayesinde fosfor dönüşüm süreçlerini hızlandırır (Menezes-Blackburn ve ark., 2018). Bu etki, mikrobiyal aktivitelerin en yoğun olduğu nötr pH koşullarında daha belirgin hale gelmektedir (Lu ve ark., 2023). Bazık topraklarda ise en yüksek organik fosfor düzeyi 409 mg/kg ile yine HKF+AG uygulamasından elde edilmiştir. Bazık ortamlarda fosforun genellikle kalsiyumla reaksiyona girerek çözünmez bileşikler oluşturması nedeniyle fosforun yayırlılığı düşer (Guppy ve ark., 2005). Ancak organik materyallerle birlikte uygulandığında, bu etkinin azaltılabildiği ve organik fosfor fraksiyonunun artırılabilirdiği görülmektedir. Organik asitlerin kalsiyuma bağlı fosfatları çözerek fosforun daha mobil hale gelmesini sağladığı bilinmektedir (Becagli ve ark., 2022).

Özellikle dikkat çeken bir diğer bulgu ise biochar uygulamalarında organik fosfor düzeylerinin belirgin şekilde düşük kalmasıdır. Bu durum, biocharın fosforu fiziksel olarak adsorbe etmesinden kaynaklanabilir. Biochar partikülleri yüzeyindeki poroz yapılar, özellikle fosfat iyonlarını tutarak organik fosforun çözünürlüğünü azaltabilir (Lehmann, 2007; Zhang ve ark., 2016). Bu durum, özellikle rizosferdeki çözünmüş fosfor kullanımı açısından olumsuz sonuçlar doğurabilir. Ayrıca biocharın yüksek pH değeri, mikrobiyal aktiviteyi ve fosfat çözücü bakteri popülasyonlarını engelleyerek organik fosfor dönüşüm süreçlerini yavaşlatabilir (Sarkhot ve ark., 2013).

İstatistiksel analizlere göre, kontrol, TSP ve Biochar ile kombine edilen uygulamaların çoğu toprak koşulunda benzer gruplarda yer aldığı ve anlamlı fark göstermediği belirlenmiştir. Bu bulgu, özellikle yalnız başına fosfor kaynağı verilmesinin organik fosfor içeriği üzerinde sınırlı etki yarattığını, asıl etkinin organik katkılarla desteklenen uygulamalardan elde edildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, organik fosfor birikimi ve yönetimi, toprak pH'sı, fosfor kaynağının çözünürlük durumu ve organik materyalin biyolojik aktiviteye olan etkisi gibi çok boyutlu etkileşimlere bağlıdır. Bu çalışmanın bulguları, özellikle ahır gübresi gibi yüksek

mikrobiyal aktivite sağlayan materyallerin fosfor kaynaklarıyla birlikte uygulanmasının, toprakta organik fosfor miktarını artırmada etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Bu tür kombinasyonlar, sürdürülebilir fosfor yönetimi açısından önemli bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.16. İnkübasyon topraklarının organik fosfor (mg/kg) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Organik P (mg/kg) |          |           |
|------------------|-------------------|----------|-----------|
|                  | Asidik            | Nötr     | Bazik     |
| Kontrol          | 386.21 e          | 571.67 g | 298.56 f  |
| TSP              | 385.70 e          | 601.50 f | 308.48 fg |
| TSP+Biochar      | 419.47 e          | 657.85 e | 326.05 de |
| TSP+Vermikompost | 415.82 e          | 650.77 e | 318.57 ef |
| TSP+AG           | 725.36 a          | 769.94 c | 335.43 cd |
| HKF              | 505.53 d          | 693.49 d | 343.15 c  |
| HKF+Biochar      | 549.19 cd         | 827.43 b | 393.71 b  |
| HKF+Vermikompost | 592.01 c          | 841.17 b | 343.25 c  |
| HKF+AG           | 673.56 b          | 927.72 a | 409.85 a  |

#### 4.1.9. Toprak fosfor adsorpsiyonu kinetiği

Toprakta fosfor adsorpsiyonunu belirlemek amacıyla Pierzynski'nin Denge çözeltisi yöntemi uygulanmıştır. Analiz sonunda asidik (Çizelge 4.17), nötr (Çizelge 4.18) ve bazik (Çizelge 4.19) reaksiyonlu toprakların süzüklerinden elde edilen P içerikleri verilmiştir. Elde edilen bu P içeriklerinin adsorplanamayan, yani çözeltide kalan fosfor içeriğini yansıtmaktadır. Toprak fosfor içerikleri zamana bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte bütün topraklarda önce artma daha sonra azalma eğilimindedir.

Çizelge 4.17. Toprak inkübasyon denemesi asidik topraklarının fosfor adsorpsiyonu analiz sonuçları.

| Uygulamalar      | P (mg/kg) |         |        |        |        |        |
|------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Başlangıç | 1. Saat | 1. Gün | 3. Gün | 5. Gün | 7. Gün |
| Kontrol          | 118.21    | 64.53   | 58.15  | 47.12  | 39.85  | 37.79  |
| TSP              | 127.35    | 72.35   | 62.23  | 55.57  | 48.72  | 46.13  |
| TSP+Biochar      | 124.89    | 63.89   | 61.42  | 52.55  | 46.13  | 41.42  |
| TSP+Vermikompost | 132.16    | 75.72   | 65.73  | 60.08  | 53.47  | 52.81  |
| TSP+AG           | 211.05    | 157.24  | 145.28 | 138.13 | 132.74 | 130.43 |
| HKF              | 162.03    | 106.85  | 98.96  | 89.26  | 83.11  | 80.49  |
| HKF+Biochar      | 127.31    | 62.98   | 61.22  | 54.86  | 48.92  | 49.78  |
| HKF+Vermikompost | 214.01    | 160.03  | 148.15 | 140.97 | 135.77 | 132.91 |
| HKF+AG           | 142.94    | 87.65   | 80.71  | 70.77  | 64.10  | 65.52  |

İnkübasyon denemesi asidik topraklarının zamana bağlı fosfor değişimlerine incelemek amacıyla fosfor adsorpsiyon kinetiği  $q_e$  hesaplanmış ve oluşturulan eğri Şekil 4.1.'de verilmiştir.

Zamana bağlı fosfor adsorpsiyonu kapasitesi ( $q_e$ ) formülü;

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) \cdot V}{m}$$

Burada;

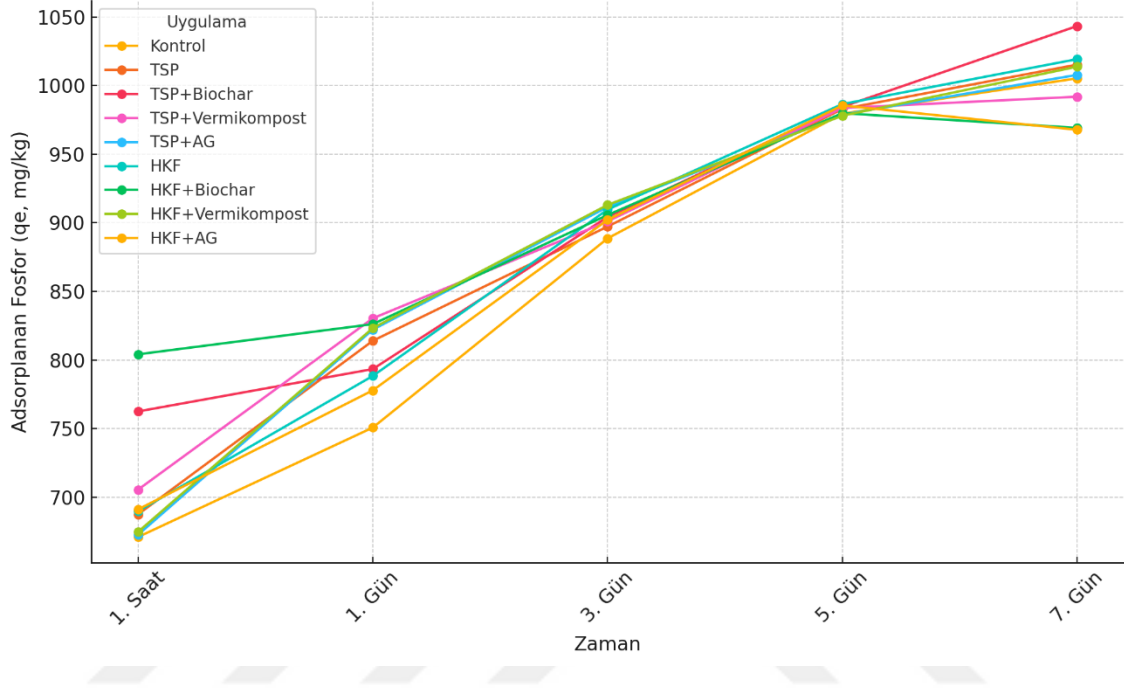
$C_o$ : Başlangıç konsantrasyonu (mg/L)

$C_e$ : Denge konsantrasyonu (mg/L)

V: Çözelti hacmi (litre) (denemede 25 ml alındığı için 0,025 L)

m: Toprak miktarı (gram) (denemede kullanılan 2 g)

Bu formül, bir gram toprakta ne kadar fosfor tutulduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.1. Asidik toprağın fosfor adsorpsiyonu kinetiği ( $q_e$ )

Her bir uygulamada belirli zaman diliminde (1saat, 1., 3., 5., 7. gün) adsorpsiyon kapasiteleri ve uygulamalar arasındaki adsorpsiyon sürecinin kinetik yapısı ortaya konmaktadır (Şekil 4.1).

TSP ve HKF gibi fosfor kaynakları kullanılarak yapılan uygulamalarda adsorpsiyonun hızlı başladığı ve zamanla doygunluğa yaklaştığı görülmektedir. Özellikle ilk saatlerde hızlı şekilde gerçekleşen adsorpsiyonun 3. Güne kadar arttığı ve 5. Günden sonra ise yavaşlama eğilimi gösterdiği gözlenmektedir. Bu durum, adsorpsiyon mekanizmasının klasik kinetik davranışından kaynaklanmaktadır. Sparks (2003) tarafından da vurgulandığı gibi, bu davranış adsorban yüzeyindeki reaktif bölgelerin başta bol olması ve zamanla dolmasıyla ilgilidir.

Özellikle TSP+Biochar uygulaması, 7. gün sonunda en yüksek adsorpsiyon kapasitesine ulaşmış ve yaklaşık 1050 mg/kg düzeyine çıkmıştır. Bu bulgu, biochar'ın yüzey alanı ve fonksiyonel grupları sayesinde toprakta P tutulumunu artırıcı etkisini desteklemektedir.

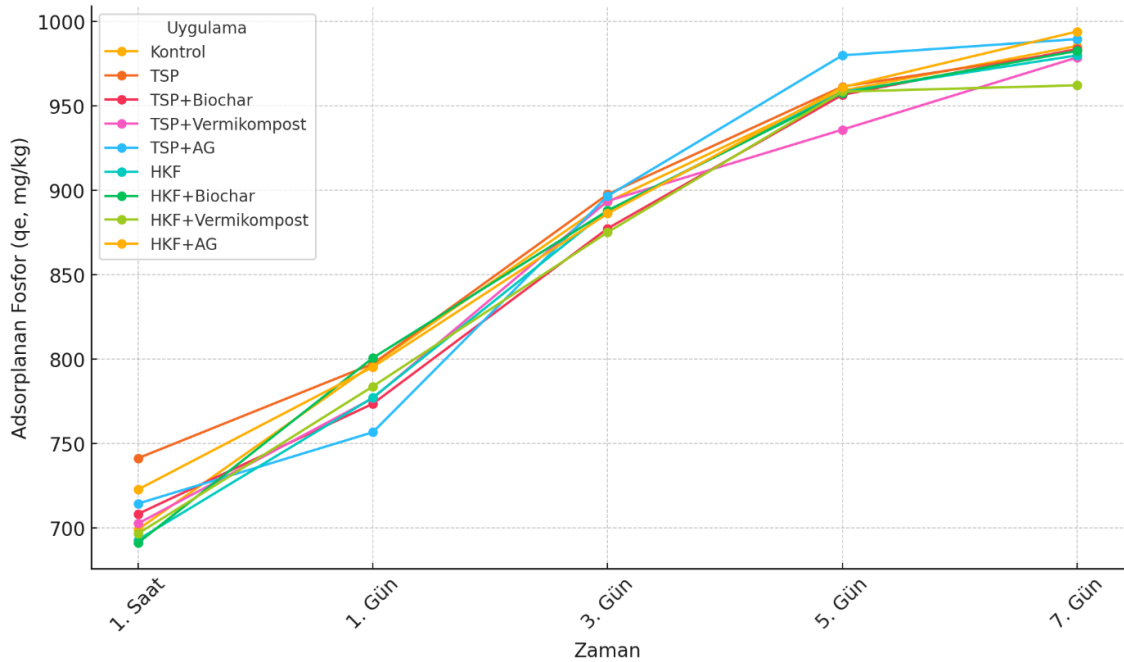
(Glaser ve Lehr, 2019; Xu ve ark., 2014). Biocharın ince gözenekli bir yapıya sahip olması, fosfat iyonlarının fizikokimyasal bağlanması için geniş yüzey alanı sağlamaktadır. Ayrıca biochar, asidik topraklarda pH tamponlayıcı etkisi göstererek, fosfatın çözünürlüğünü artırabilir ve dolayısıyla daha fazla adsorpsiyona olanak tanıyabilir (Lehmann ve Joseph, 2015). HKF+Vermikompost ve HKF+Biochar uygulamaları da benzer şekilde yüksek adsorpsiyon değerlerine ulaşarak, organik maddelerin fosfor adsorpsiyonuna olan pozitif etkilerini teyit etmektedir. Organik materyallerin, fosfor ile rekabet eden Al ve Fe iyonlarını şelatlayarak fosforun daha stabil formlarda toprakta kalmasına katkı sağladığı bilinmektedir (Guppy ve ark., 2005). Bu durum, özellikle asidik toprak koşullarında büyük önem taşır, zira düşük pH, Fe ve Al oksitlerinin fosforla reaksiyona girerek çözünmeyen kompleksler oluşturmalarına neden olmaktadır (Hedley ve ark., 1982). Organik materyaller bu iyonları bağlayarak fosforun adsorpsiyon potansiyelini koruyabilir veya artırabilir. TSP+AG ve HKF+AG uygulamaları ise diğer kombinasyonlara kıyasla daha düşük adsorpsiyon göstermiştir. AG, organik ve mineral bileşenleri bir arada içerse de, kısa sürede parçalanabilen azotlu bileşiklerin mikrobiyal aktiviteyi tetikleyerek fosforu geçici olarak immobilize ettiği ya da fosforun çözünür formda tutulmasından çok mineral formda fiksasyonuna neden olduğu düşünülebilir (Pizzeghello ve ark., 2020; Sims ve ark. 2023). Sonuçlar incelendiğinde, asidik toprak koşullarında fosfor adsorpsiyonu süreçlerinde sadece uygulanan fosfor kaynağının değil, aynı zamanda uygulanan organik katkıların da önemli rol oynadığı net şekilde ortaya çıkmaktadır.

Nötr reaksiyonlu topraklarda yapılan analiz sonunda toprakların fosfor içerikleri Çizelge 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.18. İnkübasyon denemesi nötr toprakların fosfor adsorpsiyonu analiz sonuçları.

| Uygulamalar      | P (mg/kg) |         |        |        |        |        |
|------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Başlangıç | 1. Saat | 1. Gün | 3. Gün | 5. Gün | 7. Gün |
| Kontrol          | 106.74    | 50.80   | 42.99  | 35.29  | 30.02  | 27.91  |
| TSP              | 122.80    | 63.49   | 59.02  | 50.99  | 45.89  | 44.19  |
| TSP+Biochar      | 109.65    | 52.98   | 47.76  | 39.46  | 33.13  | 30.96  |
| TSP+Vermikompost | 129.34    | 73.12   | 67.19  | 57.85  | 54.47  | 51.05  |
| TSP+AG           | 209.61    | 152.45  | 149.07 | 137.88 | 131.22 | 130.45 |
| HKF              | 177.07    | 121.62  | 114.89 | 106.03 | 100.41 | 98.68  |
| HKF+Biochar      | 115.04    | 59.74   | 50.98  | 44.01  | 38.44  | 36.44  |
| HKF+Vermikompost | 197.83    | 142.09  | 135.12 | 127.82 | 121.16 | 120.86 |
| HKF+AG           | 158.78    | 100.95  | 95.15  | 87.88  | 81,9   | 79.26  |

Nötr reaksiyonlu toprakların zamana bağlı fosfor değişimlerini incelemek amacıyla fosfor adsorpsiyon kinetiği yani  $q_e$  hesaplandı ve oluşturulan eğri Şekil 4.2.’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Nötr toprağın fosfor adsorpsiyonu kinetiği ( $q_e$ ).

Şekilde her uygulamanın adsorpsiyon kinetiği eğrisi genel olarak tüm uygulamalarda zaman ilerledikçe adsorpsiyon miktarının artış gösterdiği, 7. gün itibarıyla adsorpsiyonun durağan bir eğilim kazandığı gözlemlenmektedir. Bu durum, fosforun toprak-kolloid kompleksleri tarafından hızla tutulduğunu ve belirli bir süreden sonra sistemdeki adsorpsiyon potansiyelinin doyuma ulaştığını göstermektedir. Özellikle HKF (ham kemik unu) ve TSP (triple süper fosfat) gibi inorganik kaynaklar, ilk saatlerde yüksek bir adsorpsiyon potansiyeli sergilemiş, bunu organik materyal kombinasyonlarıyla desteklenen uygulamalar takip etmiştir.

TSP uygulaması, ilk saatten itibaren en hızlı ve en yüksek adsorpsiyon oranını gösteren uygulamalardan biri olmuştur. Bu durum, TSP'nin yüksek çözünürlüklü bir fosfor kaynağı olması ve toprağa uygulandığında hızla çözünerek adsorplanabilir forma geçmesiyle açıklanabilir (Sharpley, 1996). Ayrıca TSP+Biochar ve TSP+Vermikompost uygulamaları da dikkat çekici bir artış göstermiştir. Özellikle TSP+Vermikompost kombinasyonu, 7. gün itibarıyla TSP'den sonra en yüksek qe değerine ulaşmıştır. Bu bulgu, vermikompostun toprakta mikrobiyal aktiviteyi ve organik madde içeriğini artırarak P'nin yavaş salınımını teşvik ettiğini ve dolayısıyla adsorpsiyon kapasitesini uzatılmış süre boyunca desteklediğini düşündürmektedir (Kashem ve ark., 2011; Blake ve ark., 2023). Biochar katkılı uygulamalar, özellikle ilk saatlerde düşük adsorpsiyon değerleri göstermesine rağmen zamanla artış eğilimi sergilemiştir. Biocharın yüksek yüzey alanı ve gözenekli yapısının fosforu fiziksel olarak tutma kapasitesini zaman içerisinde artırmasıyla açıklanabilir (Lehmann ve Joseph, 2009). Ancak nötr toprak koşullarında biocharın etkisi asidik ortamlara kıyasla daha sınırlı kalmıştır, çünkü biocharın fosfor adsorpsiyonunu teşvik eden pH yükseltici etkisi burada zaten doğal olarak mevcuttur (Yuan ve Xu, 2011).

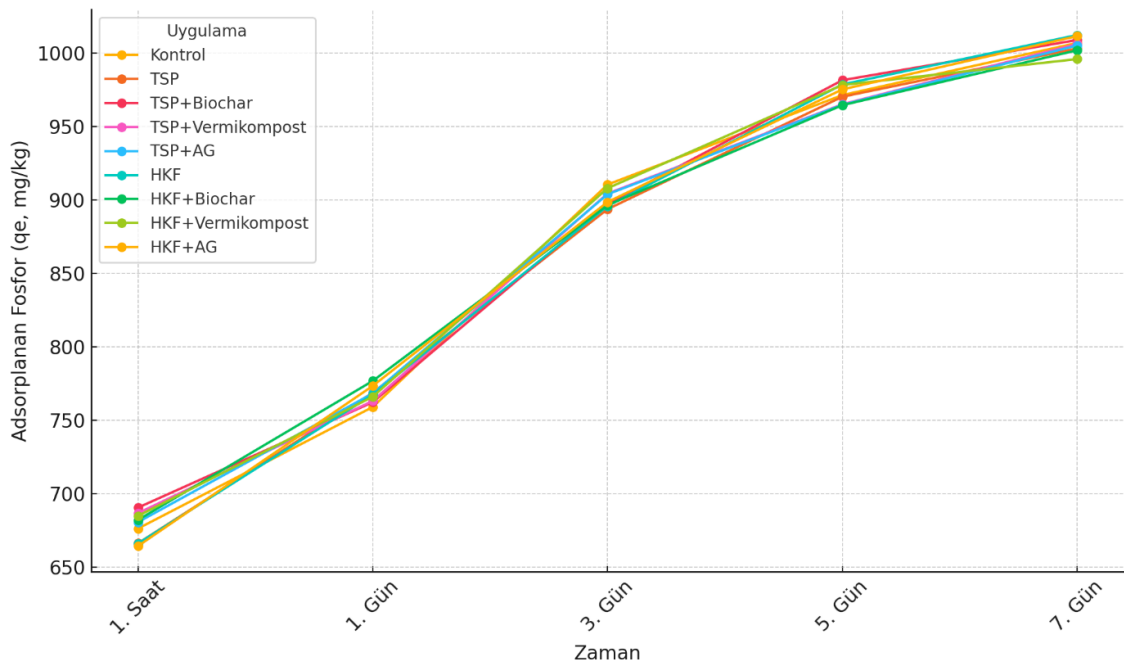
HKF uygulamaları incelendiğinde, özellikle HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost kombinasyonlarının 1. saatten itibaren önemli bir adsorpsiyon performansı gösterdiği görülmektedir. HKF'nin içeriğindeki kalsiyum sayesinde fosforun Ca-P kompleksleri şeklinde toprağa bağlanmasını kolaylaştırdığı bilinmektedir (Eghball ve ark., 1996). TSP+AG ve HKF+AG uygulamaları ise, tüm zaman dilimlerinde diğer kombinasyonlara göre nispeten daha düşük qe değerleri üretmiştir. AG toprakta metal şelatlayıcı özelliği nedeniyle fosfat iyonları ile yarışarak adsorpsiyonu engellemiş olabileceği düşünülmektedir (Gerke, 1992).

Bazık toprakta yapılan fosfor adsorpsiyon kapasitesi analizi sonuçları Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19. İnkübasyon denemesi bazık toprakların fosfor adsorpsiyonu analiz sonuçları.

| Uygulamalar      | P (mg/kg) |         |        |        |        |        |
|------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Başlangıç | 1. Saat | 1. Gün | 3. Gün | 5. Gün | 7. Gün |
| Kontrol          | 125.90    | 71.79   | 65.17  | 53.06  | 48.19  | 45.35  |
| TSP              | 137.39    | 84.08   | 75.88  | 65.89  | 59.77  | 57.14  |
| TSP+Biochar      | 126.43    | 71.18   | 65.44  | 54.65  | 47.91  | 45.72  |
| TSP+Vermikompost | 142.24    | 87.29   | 81.18  | 69.89  | 65.03  | 61.75  |
| TSP+AG           | 210.43    | 155.97  | 148.96 | 138.12 | 133.25 | 130.02 |
| HKF              | 175.42    | 122.12  | 114.02 | 103.75 | 97.13  | 94.44  |
| HKF+Biochar      | 131.04    | 76.46   | 68.89  | 59.32  | 53.88  | 50.89  |
| HKF+Vermikompost | 198.75    | 143.95  | 137.46 | 126.11 | 120.49 | 119.08 |
| HKF+AG           | 162.90    | 109.74  | 101.02 | 91.01  | 84.88  | 81.98  |

Bazık reaksiyonlu toprakların zamana bağlı fosfor değişimlerini incelemek amacıyla fosfor adsorpsiyon kinetiği yani  $q_e$  hesaplandı ve oluşturulan eğri Şekil 4.3.’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Bazık toprağın fosfor adsorpsiyon kinetiği ( $q_e$ ).

Bazik topraklarda fosfor adsorpsiyonunun mekanizması, genellikle kalsiyum (Ca)-fosfat komplekslerinin oluşumu yoluyla gerçekleşmekte olup, özellikle yüksek pH koşullarında bu tür komplekslerin stabilitesi artmaktadır. Çalışmada bu etki belirgin biçimde gözlenmiştir. Tüm uygulamalarda, zaman ilerledikçe adsorpsiyonun arttığı, özellikle 3. günden sonra eğrilerin durağan hale gelerek adsorpsiyonun dengeye yaklaştığı görülmüştür. TSP uygulaması, çözünürlüğü yüksek bir kaynak olması nedeniyle ilk saatlerde hızlı bir adsorpsiyon göstermiş, ancak 7. gün itibarıyla adsorpsiyon miktarında görece sınırlı bir artış görülmüştür. Bu, TSP'nin fosfatları hızlıca serbest bırakmasına rağmen, bazik topraklarda Ca-P kompleksleşmesinin hızla gerçekleşerek çözünür P formunun kısa sürede sabitlenmesiyle açıklanabilir (Schachtman ve ark., 1998, Wierzbowska ve ark, 2020). TSP+Vermikompost uygulaması, 7. gün itibarıyla en yüksek adsorpsiyon düzeyine ulaşmıştır. Bu durum, vermikompostun toprakta mikrobiyal aktiviteyi ve organik asit salınımını artırması sayesinde fosfatın Ca ile kompleksleşmesini geciktirerek daha uzun süre çözünür halde kalmasına olanak sağlamasıyla ilişkilidir (Kashem ve ark., 2011). HKF içeren uygulamalar, özellikle HKF+Vermikompost ve HKF+Biochar kombinasyonları, ilk saatten itibaren güçlü bir adsorpsiyon eğilimi sergilemiştir ve bu durumda HKF'nin kalsiyum içeriğinin Ca-P komplekslerini kolaylaştırması ve organik materyalin bunu destekleyici olması etkili olmuştur.

Genel olarak bu çalışmanın sonuçları, bazik toprak koşullarında fosfor adsorpsiyonunun pH'ya, fosfor kaynağının çözünürlüğüne ve uygulanan organik materyallerin kimyasal özelliklerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Organik materyallerin özellikle mikrobiyal aktiviteyi artırarak P'nin daha uzun süreli adsorpsiyonuna katkı sağladığı, buna karşın şelatlayıcı organik bileşiklerin fosfor adsorpsiyonunu azaltabildiği gözlenmiştir. Bu nedenle, bazik topraklarda fosfor gübrelemesinde, çözünürlüğü yüksek kaynakların yanında mikroorganizma destekli organik materyallerin kullanımı, bitki yararı açısından daha dengeli bir fosfor yönetimi sağlayabilir.

#### 4.1.10. Toprakta ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprakta ekstrakte edilebilir potasyum (K), bitkiler için kolayca alınabilir formda bulunan K fraksiyonunu temsil eder. Bu form, özellikle bitki metabolizmasında enzim aktivasyonu, ozmotik denge, su alımı ve fotosentez gibi süreçlerde kritik rol oynamaktadır (Marschner, 2012). Bu çalışmanın bir parçası olarak, farklı fosfor kaynakları ve organik materyal uygulamasının farklı toprak pH koşulunda ekstrakte edilebilir K düzeyine etkisi incelenmiş ve önemli bulgular elde edilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.20’de verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik topraklara yapılan uygulamalarda K değerinin düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta HKF, HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise HKF+Biochar grubu dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+AG, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise TSP+Vermikompost, HKF ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, Kontrol, TSP+Biochar, TSP+AG ve HKF+AG gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP ve HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir. Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre K’un normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprak uygulama sonuçları incelendiğinde de K’un normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.20).

İnkübasyon denemesi K analiz sonuçları yapılan uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p<0.05$ ). Yapılan Duncan testi sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.21’de verilmiştir. Farklı harfler aynı toprak grubunda uygulamaların istatistiksel olarak önemli olduğunu, göstermektedir. Asit toprak koşullarında en yüksek K değeri 337.58 mg/kg ile HKF+Ahır Gübresi (AG) uygulamasında gözlenmiştir. Bu uygulamayı,

Çizelge 4.20. İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | K (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|-----------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.      | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 167       | 170  | 169  | 1.63      | 2.66    | 0.96              | -0.78              | -0.23 |
|        | TSP              | 160       | 164  | 163  | 1.76      | 3.12    | 1.08              | -0.80              | 1.60  |
|        | TSP+Biochar      | 151       | 194  | 174  | 18.21     | 331.84  | 10.47             | -0.28              | -0.75 |
|        | TSP+Vermikompost | 263       | 297  | 282  | 14.32     | 205.08  | 5.08              | -0.64              | 0.09  |
|        | TSP+AG           | 202       | 226  | 215  | 10.19     | 103.93  | 4.74              | -0.44              | -0.48 |
|        | HKF              | 293       | 317  | 306  | 11.93     | 143.38  | 3.90              | -0.19              | -4.62 |
|        | HKF+Biochar      | 283       | 303  | 293  | 9.57      | 91.58   | 3.27              | 0.13               | -4.08 |
|        | HKF+Vermikompost | 284       | 314  | 298  | 13.81     | 190.97  | 4.63              | 0.28               | -3.67 |
|        | HKF+AG           | 319       | 351  | 337  | 13.50     | 182.45  | 4.01              | -1.02              | 1.54  |
| Nötr   | Kontrol          | 133       | 140  | 137  | 2.98      | 8.90    | 2.18              | -0.28              | 1.16  |
|        | TSP              | 158       | 162  | 160  | 1.42      | 2.01    | 0.89              | 0.85               | 0.72  |
|        | TSP+Biochar      | 163       | 166  | 164  | 1.28      | 1.62    | 0.78              | 0.08               | -0.85 |
|        | TSP+Vermikompost | 236       | 265  | 252  | 12.52     | 156.80  | 4.97              | -0.41              | -0.58 |
|        | TSP+AG           | 201       | 213  | 208  | 6.11      | 37.38   | 2.94              | -0.38              | -3.78 |
|        | HKF              | 240       | 250  | 243  | 4.67      | 22.05   | 1.92              | 1.92               | 3.76  |
|        | HKF+Biochar      | 237       | 248  | 242  | 4.89      | 23.88   | 2.02              | -0.21              | -2.30 |
|        | HKF+Vermikompost | 269       | 297  | 281  | 11.63     | 135.27  | 4.14              | 0.90               | 0.81  |
|        | HKF+AG           | 281       | 298  | 289  | 8.62      | 74.35   | 2.98              | 0.20               | -4.81 |
| Bazik  | Kontrol          | 138       | 140  | 138  | 0.74      | 0.70    | 0.54              | 0.82               | 1.15  |
|        | TSP              | 138       | 145  | 141  | 2.67      | 7.13    | 1.89              | 1.27               | 2.12  |
|        | TSP+Biochar      | 144       | 145  | 145  | 0.41      | 0.17    | 0.28              | 0.00               | 0.77  |
|        | TSP+Vermikompost | 196       | 208  | 202  | 6.76      | 45.67   | 3.35              | 0.05               | -5.62 |
|        | TSP+AG           | 238       | 242  | 240  | 1.62      | 2.62    | 0.68              | 0.56               | -0.59 |
|        | HKF              | 279       | 284  | 282  | 2.32      | 5.37    | 0.82              | -0.43              | -3.57 |
|        | HKF+Biochar      | 202       | 219  | 211  | 7.50      | 56.23   | 3.55              | -0.32              | -2.22 |
|        | HKF+Vermikompost | 222       | 243  | 236  | 9.55      | 91.17   | 4.05              | -1.85              | 3.55  |
|        | HKF+AG           | 267       | 270  | 269  | 1.26      | 1.58    | 0.47              | -0.08              | -1.32 |

sırasıyla HKF+Vermikompost (298.29 mg/kg) ve HKF+Biochar (292.88 mg/kg) izlemiştir. Kontrol grubundaki değer (170.75 mg/kg) en düşük düzeyde bulunmuş ve TSP ile TSP+Biochar uygulamaları arasında anlamlı fark olmadığı belirlenmiştir ( $p<0.05$ ). Bu bulgular, özellikle ahır gübresi gibi potasyumca zengin materyallerin toprakta K içeriğini doğrudan artırabildiğini göstermektedir (Hati ve ark., 2006). Ayrıca, HKF'nin düşük çözünürlüklü yapısının asit koşullarda çözünürlüğünün artması, toprak çözeltisinde K ile birlikte Ca ve P mobilitesini teşvik edebilir (Hinsinger, 2001). Nötr topraklarda en yüksek K düzeyleri %281.04 mg/kg (HKF+Vermikompost) ve %288.90 mg/kg (HKF+AG) uygulamalarında kaydedilmiştir. Bu uygulamaların yüksek K düzeyleri, vermikompost ve ahır gübresinin potasyumca zengin yapısına ve mikrobiyal ayrışma süreçlerini hızlandırıcı etkilerine bağlanabilir. Vermikompost, özellikle mineralizasyon sürecinde potasyumu daha hızlı mobilize ederek toprak çözeltisine geçişini kolaylaştırmaktadır (Domínguez ve Edwards, 2011). Düşük düzeyli K değerleri ise sırasıyla Kontrol (136.94 mg/kg), TSP (159.69 mg/kg) ve TSP+Biochar (163.98 mg/kg) uygulamalarında gözlenmiştir. Bu sonuç, fosfor gübrelerinin doğrudan K içeriğine katkısının sınırlı olduğunu, biocharın ise geçici iyon adsorpsiyonu yoluyla K'yu immobilize edebileceğini göstermektedir (Yao ve ark., 2012). Bazık toprak koşullarında en yüksek K düzeyi HKF (%281.58 mg/kg) uygulamasında ölçülmüştür. Bunu HKF+AG (268.90 mg/kg) ve HKF+vermikompost (235.81 mg/kg) takip etmiştir. Bu bulgular, yüksek pH koşullarında bile HKF'nin potasyum çözünürlüğünü desteklediğini ve organik katkıların bu süreci güçlendirdiğini göstermektedir. Özellikle ahır gübresinin yüksek K içeriği ve toprak iyon değişim kapasitesini artırıcı etkisi, potasyumun alınabilirliğini pozitif yönde etkilemiştir (Mikkelsen, 2005). Analiz sonuçları incelendiğinde, kontrol (138.38 mg/kg), TSP (140.75 mg/kg) ve TSP+Biochar (144.50 mg/kg) uygulamaları bazık toprakta da en düşük K düzeylerini sağladığı dikkat çekmektedir ve bu durum, ancak hem mineral gübrelerin yetersiz K katkısı hem de biocharın iyon bağlayıcı özelliği ile açıklanabilir (Lehmann ve Joseph, 2024).

Duncan testi sonuçlarına göre, hem fosfor kaynağı hem de organik materyal türü ekstrakte edilebilir potasyum düzeyi üzerinde anlamlı farklılıklar yaratmıştır ( $p<0.05$ ). Özellikle HKF'nin organik materyallerle birlikte uygulamalarının, tüm toprak reaksiyonlarında en yüksek K düzeylerini sağlaması, bu uygulamaların potasyum yönetimi açısından birlikte kullanımının daha iyi bir etki yarattığını göstermektedir. Ayrıca biocharın K açısından

kısa vadede sınırlayıcı etkiler yaratabileceği göz önünde bulundurulmalı; ancak bu materyalin uzun vadeli toprak iyileştirici rolü dikkate alınmalıdır (Glaser ve ark., 2002).

Çizelge 4.21. İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | K (mg/kg) |          |          |
|------------------|-----------|----------|----------|
|                  | Asidik    | Nötr     | Bazik    |
| Kontrol          | 170.75 e  | 136.94 e | 138.38 f |
| TSP              | 163.04 e  | 159.69 d | 140.75 f |
| TSP+Biochar      | 174.27 e  | 163.98 d | 144.50 f |
| TSP+Vermikompost | 282.17 c  | 251.58 b | 201.73 e |
| TSP+AG           | 215.58 d  | 208.00 c | 239.52 c |
| HKF              | 306.63 b  | 242.75 b | 281.58 a |
| HKF+Biochar      | 292.88 bc | 242.42 b | 211.00 d |
| HKF+Vermikompost | 298.29 bc | 281.04 a | 235.81 c |
| HKF+AG           | 337.58 a  | 288.90 a | 268.90 b |

#### 4.1.11. Toprakta ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Topraktaki ekstrakte edilebilir kalsiyum (Ca), bitkiler için kullanılabilir formda bulunan, özellikle hücre duvarı yapısı, hücre bölünmesi ve zar geçirgenliği gibi kritik fizyolojik süreçlerde görev alan bir makro besin elementidir (White ve Broadley, 2003). Ca, aynı zamanda toprak yapısının fiziksel stabilitesinde, katyon değişim kapasitesinde ve pH tamponlama gücünde de önemli rol oynamaktadır. Bu bağlamda, fosforlu gübrelerin ve organik katkıların Ca mobilizasyonuna etkileri, sürdürülebilir toprak yönetimi açısından büyük önem arz etmektedir. Toprak inkübasyon çalışmasının Ca analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.22’de verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın Ca içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik topraklarında düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta yalnızca Kontrol grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise yalnızca TSP grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP, TSP+AG, HKF ve HKF+Vermikompost gruplarının normal dağılım gösterdiği ve yalnızca Kontrol grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre Ca’da normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprağın uygulamalarının sonuçları incelendiğinde de Ca’un normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.22).

İnkübasyon denemesi Ca analiz sonuçları yapılan uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p < 0.05$ ). Yapılan Duncan testi sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.23’de verilmiştir. Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki Ca içeriğinde anlamlı değişime neden olmuştur ve farklı harfler aynı toprak grubunda uygulamaların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir. Asidik topraklarda en yüksek Ca değeri 2510 mg/kg ile Ham kaya fosfat (HKF) uygulamasında saptanmıştır.

Çizelge 4.22. İnkübasyon topraklarının ektrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Ca (mg/kg) |      |      |           |          |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|----------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans  | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 922        | 997  | 970  | 33.35     | 1112.46  | 3.44              | -1.64              | 2.86  |
|        | TSP              | 982        | 1008 | 991  | 11.58     | 134.29   | 1.17              | 1.48               | 1.91  |
|        | TSP+Biochar      | 1041       | 1263 | 1187 | 102.14    | 10434.50 | 8.60              | -1.49              | 1.91  |
|        | TSP+Vermikompost | 1025       | 1298 | 1172 | 114.60    | 13133.77 | 9.78              | -0.51              | 0.48  |
|        | TSP+AG           | 2109       | 2165 | 2139 | 22.98     | 528.10   | 1.07              | -0.39              | 1.45  |
|        | HKF              | 2497       | 2523 | 2510 | 10.68     | 114.20   | 0.43              | -0.08              | 1.49  |
|        | HKF+Biochar      | 1091       | 1318 | 1214 | 95.67     | 9154.48  | 7.88              | -0.50              | 0.22  |
|        | HKF+Vermikompost | 2043       | 2155 | 2092 | 46.60     | 2171.60  | 2.23              | 0.87               | 1.86  |
|        | HKF+AG           | 1825       | 2131 | 2003 | 129.22    | 16699.00 | 6.45              | -1.06              | 1.78  |
| Nötr   | Kontrol          | 7399       | 7432 | 7415 | 13.83     | 191.37   | 0.18              | 0.45               | 1.61  |
|        | TSP              | 7505       | 7847 | 7741 | 158.42    | 25095.99 | 2.05              | -1.91              | 3.72  |
|        | TSP+Biochar      | 7838       | 7915 | 7881 | 31.84     | 1013.54  | 0.40              | -0.82              | 1.71  |
|        | TSP+Vermikompost | 7493       | 7534 | 7512 | 16.97     | 287.83   | 0.23              | 0.54               | 1.04  |
|        | TSP+AG           | 7928       | 7954 | 7942 | 11.50     | 132.20   | 0.14              | -0.58              | -0.93 |
|        | HKF              | 7940       | 7998 | 7973 | 24.67     | 608.72   | 0.31              | -0.75              | 0.46  |
|        | HKF+Biochar      | 7580       | 7741 | 7652 | 67.42     | 4544.76  | 0.88              | 0.67               | 1.00  |
|        | HKF+Vermikompost | 8040       | 8483 | 8275 | 181.99    | 33119.70 | 2.20              | -0.42              | 1.40  |
|        | HKF+AG           | 8036       | 8113 | 8078 | 32.11     | 1031.11  | 0.40              | -0.52              | 0.98  |
| Bazik  | Kontrol          | 5027       | 5107 | 5057 | 34.89     | 1217.43  | 0.69              | 1.58               | 2.96  |
|        | TSP              | 5269       | 5323 | 5298 | 22.40     | 502.09   | 0.42              | -0.64              | 1.62  |
|        | TSP+Biochar      | 5340       | 5360 | 5350 | 9.67      | 93.64    | 0.18              | -0.09              | -4.43 |
|        | TSP+Vermikompost | 5127       | 5173 | 5151 | 22.02     | 424.70   | 0.43              | -0.16              | -4.35 |
|        | TSP+AG           | 5293       | 5598 | 5438 | 134.09    | 17981.54 | 2.47              | 0.26               | -1.85 |
|        | HKF              | 5338       | 5390 | 5367 | 22.37     | 500.59   | 0.42              | -0.54              | -0.57 |
|        | HKF+Biochar      | 5171       | 5237 | 5209 | 31.16     | 971.38   | 0.60              | -0.57              | -2.55 |
|        | HKF+Vermikompost | 5328       | 5509 | 5420 | 78.13     | 6104.52  | 1.44              | -0.13              | -1.32 |
|        | HKF+AG           | 5156       | 5524 | 5351 | 170.78    | 29167.75 | 3.19              | -0.21              | -3.60 |

Elde edilen bu sonuç, HKF'nin doğal kalsiyum fosfat bileşikleri (örneğin apatit) içermesi nedeniyle Ca kaynağı olarak etkili olabileceğini göstermektedir (Roy ve ark., 2006). HKF+AG (2003 mg/kg) ve HKF+Vermikompost (2092 mg/kg) gibi kombinasyonlar da yüksek Ca düzeyleri sağlayarak organik materyallerin Ca mobilizasyonuna katkı sağladığını göstermiştir. Kontrol grubunda (976 mg/kg) ve TSP uygulamasında (991 mg/kg) gözlemlenen düşük değerler, bu materyallerin ya Ca içermemesi ya da toprak çözeltisine Ca katkısının sınırlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, asidik topraklarda Ca eksikliğinin varlığından söz edilebileceğini ancak uygun mineral ve organik kaynaklarla giderilebileceğini göstermektedir (Havlin ve ark., 2014). Nötr koşullarda en yüksek Ca düzeyi 8274 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuç, hem ham kaya fosfatın çözünürlüğünün nötr pH'da artışı hem de vermikompostun Ca içeriği ve mikrobiyal mineralizasyon hızını artırması ile açıklanabilir (Domínguez ve Edwards, 2011; Hinsinger, 2001). Ayrıca, ahır gübresiyle yapılan uygulamalarda da (8077 mg/kg) yüksek Ca değerleri elde edilmiş, bu da organik materyalin Ca içeriğine katkı sunduğunu ve biyolojik çözünürlüğü artırdığını göstermiştir (Tejada ve ark., 2006). Bazik topraklarda ise en yüksek Ca değeri 5438 mg/kg ile TSP+AG uygulamasında gözlenmiş, bunu HKF+Vermikompost ve HKF+AG uygulamaları takip etmiştir. Bazik topraklarda kalsiyum genellikle çözünmez formlarda bulunur; ancak organik asitlerin varlığı, bu bileşiklerin çözünürlüğünü artırarak Ca'un ekstrakte edilebilir formunu artırabilir (Glaser ve ark., 2002). TSP ve Biochar uygulamaları ise (örneğin TSP+Biochar: 5350 mg/kg) görece daha düşük Ca değerleri üretmiştir. Bu durum, biocharın yüzey yükü ve iyon değişim kapasitesinin Ca adsorpsiyonuna neden olabileceğini düşündürmektedir (Lehmann ve ark., 2011). Bu etki kısa vadede mobil Ca'u sınırlasa da uzun vadede toprak yapısını olumlu yönde etkileyebilir.

Duncan testi sonuçları, tüm toprak reaksiyonlarında organik katkılarla birlikte uygulanan HKF'nin ve TSP'nin Ca düzeyi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı fark yarattığını göstermektedir ( $p<0.05$ ). Özellikle HKF+Vermikompost ve HKF+AG uygulamaları, kalsiyum yönetimi açısından önemli uygulamalar olarak öne çıkmaktadır. Bu kombine uygulamalar hem Ca içeriğini artırmakta hem de fosfor ve diğer katyonların çözünürlüğüne katkı sağlayarak toplam besin yarıyışlılığını iyileştirmektedir.

Çizelge 4.23. İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | Ca (mg/kg) |            |            |
|------------------|------------|------------|------------|
|                  | Asidik     | Nötr       | Bazik      |
| Kontrol          | 976.83 e   | 7414.48 e  | 5056.56 e  |
| TSP              | 991.54 e   | 7741.00 d  | 5298.81 bc |
| TSP+Biochar      | 1187.13 d  | 7880.88 c  | 5350.52 ab |
| TSP+Vermikompost | 1172.94 d  | 7512.13 e  | 5151.04 de |
| TSP+AG           | 2139.35 b  | 7942.19 c  | 5438.29 a  |
| HKF              | 2510.48 a  | 7972.52 bc | 5367.12 ab |
| HKF+Biochar      | 1214.08 d  | 7651.83 d  | 5209.58 cd |
| HKF+Vermikompost | 2092.67 bc | 8274.46 a  | 5420.95 ab |
| HKF+AG           | 2003.21 c  | 8077.69 b  | 5351.35 ab |

#### 4.1.12. Toprakta ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprakta ekstrakte edilebilir magnezyum (Mg), bitki tarafından kolayca alınabilen formdaki Mg fraksiyonunu temsil eder ve klorofil sentezi, enzim aktivasyonu, fosfat metabolizması gibi hayati biyokimyasal süreçlerde rol oynar (Marschner, 2012). Ayrıca toprak yapısında kil mineralleri ile ilişkili olarak katyon değişim kapasitesini etkiler ve Ca:Mg dengesinin korunmasında kritik rol oynar. Yapılan çalışmanın bu kısmında, farklı fosforlu gübrelerin ve organik materyallerin Mg düzeyine etkisi, üç farklı toprak reaksiyonu (asidik, nötr, bazik) üzerinden değerlendirilmiştir.

Toprak inkübasyon çalışmasının Mg analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.24’de verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik toprakların uygulamalara göre Mg içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta yalnızca HKF grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP+Vermikompost ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, yalnızca kontrol grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise TSP ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Vermikompost ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre Mg’da normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprağın uygulamalarının sonuçları incelendiğinde de Mg’un normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.24).

Yapılan Duncan testi sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.25’de verilmiştir. Farklı harfler aynı toprak grubunda uygulamaların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir. Asidik topraklarda en yüksek Mg düzeyi 344.38 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında elde edilmiştir. Bu

Çizelge 4.24. İnkübasyon topraklarının ektrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Mg (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 90         | 92   | 91   | 0.95      | 0.91    | 1.04              | 1.29               | 1.52  |
|        | TSP              | 97         | 99   | 98   | 0.61      | 0.37    | 0.62              | 0.38               | 1.58  |
|        | TSP+Biochar      | 91         | 103  | 98   | 4.97      | 24.78   | 5.07              | -0.92              | 1.74  |
|        | TSP+Vermikompost | 90         | 103  | 97   | 5.54      | 30.70   | 5.71              | -0.23              | 0.89  |
|        | TSP+AG           | 334        | 349  | 341  | 6.46      | 41.77   | 1.89              | 0.80               | 1.02  |
|        | HKF              | 257        | 265  | 260  | 3.77      | 14.23   | 1.45              | 1.21               | 0.75  |
|        | HKF+Biochar      | 109        | 114  | 112  | 2.02      | 4.09    | 1.80              | -0.75              | 1.19  |
|        | HKF+Vermikompost | 332        | 352  | 344  | 8.95      | 80.19   | 2.60              | -1.00              | 0.01  |
|        | HKF+AG           | 232        | 238  | 236  | 3.13      | 9.80    | 1.33              | -1.92              | 3.77  |
| Nötr   | Kontrol          | 482        | 502  | 493  | 9.52      | 90.61   | 1.93              | -0.17              | -3.83 |
|        | TSP              | 511        | 551  | 531  | 16.13     | 260.18  | 3.04              | 0.12               | 1.00  |
|        | TSP+Biochar      | 534        | 535  | 535  | 0.46      | 0.21    | 0.09              | 0.50               | 0.26  |
|        | TSP+Vermikompost | 496        | 507  | 500  | 4.50      | 499.09  | 0.90              | 1.40               | 2.39  |
|        | TSP+AG           | 686        | 706  | 696  | 8.10      | 65.68   | 1.16              | 0.41               | 1.04  |
|        | HKF              | 622        | 625  | 624  | 1.44      | 2.07    | 0.23              | -1.82              | 3.48  |
|        | HKF+Biochar      | 516        | 519  | 517  | 1.26      | 1.59    | 0.24              | -0.09              | -0.15 |
|        | HKF+Vermikompost | 719        | 734  | 726  | 6.18      | 38.21   | 0.85              | -0.11              | 0.07  |
|        | HKF+AG           | 604        | 620  | 613  | 6.89      | 47.43   | 1.12              | -0.94              | 0.21  |
| Bazik  | Kontrol          | 595        | 606  | 600  | 4.94      | 24.44   | 0.82              | 0.66               | 1.71  |
|        | TSP              | 642        | 649  | 645  | 3.79      | 14.39   | 0.59              | 0.09               | -5.35 |
|        | TSP+Biochar      | 618        | 649  | 634  | 12.66     | 160.48  | 2.00              | -0.16              | 1.48  |
|        | TSP+Vermikompost | 621        | 622  | 621  | 0.47      | 0.22    | 0.08              | 1.53               | 2.52  |
|        | TSP+AG           | 756        | 838  | 805  | 35.59     | 1266.96 | 4.42              | -1.08              | 0.79  |
|        | HKF              | 662        | 702  | 687  | 17.16     | 294.63  | 2.50              | -1.37              | 2.37  |
|        | HKF+Biochar      | 607        | 617  | 611  | 4.59      | 21.11   | 0.75              | 0.63               | -2.43 |
|        | HKF+Vermikompost | 755        | 790  | 774  | 14.92     | 222.77  | 1.93              | -0.52              | -0.38 |
|        | HKF+AG           | 686        | 723  | 705  | 15.48     | 239.82  | 2.20              | -0.25              | 0.01  |

durum, hem HKF'nin doğal Mg içeriğine hem de vermikompostun mikrobiyal aktiviteyi artırıcı etkisine bağlanabilir. Vermikompost, organik materyalin hızlı ayrışmasını teşvik ederek besin elementlerinin mineralizasyonunu hızlandırır (Domínguez ve Edwards, 2011). Aynı zamanda fosforlu gübrelerin magnezyum çözünürlüğünü artırıcı etkiye sahip olduğu da belirtilmektedir (Hinsinger, 2001). Kontrol grubunda (9217 mg/kg) ve TSP+vermikompost (97.35 mg/kg) gibi mineral bazlı uygulamalarda gözlemlenen düşük Mg değerleri, bu materyallerin sınırlı Mg içeriği ve asit koşullarda Mg'un Ca ile rekabeti nedeniyle toprak çözeltisinde baskılanması ile açıklanabilir (Fageria ve ark., 2011). Nötr topraklarda en yüksek Mg değeri 726.25 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında gözlenmiştir. Elde edilen bu değer, vermikompostun magnezyum mineralizasyonunu desteklediğini ve pH'nın Mg çözünürlüğü açısından optimal bir düzey sunduğunu göstermektedir (Tejada ve Benítez, 2006). Bunu 695.54 mg/kg ile TSP+AG ve 623.96 mg/kg ile HKF uygulamaları takip etmiştir. Ahır gübresinin hem doğrudan Mg içermesi hem de mikrobiyal faaliyetleri desteklemesi bu yüksek değerlere katkı sağlamıştır (Hati ve ark., 2006). En düşük değerler kontrol (492.58 mg/kg) ve TSP+Vermikompost (500.27 mg/kg) gruplarında gözlenmiştir ( $p<0.05$ ). Bu sonuçlar, mineral gübrelerin tek başına Mg düzeyini artırmakta yetersiz olduğunu da göstermektedir. Bazı topraklarda en yüksek Mg düzeyi 805 mg/kg ile TSP+AG uygulamasında saptanmıştır. Bu durum, ahır gübresinin yüksek kation değişim kapasitesiyle toprakta Mg'un sabitlenmesini önleyerek çözeltide serbest halde kalmasını sağladığını göstermektedir (White ve Broadley, 2003). Aynı zamanda HKF+Vermikompost (774.75 mg/kg) ve HKF+AG (705.84 mg/kg) gibi kombine uygulamalar da benzer şekilde Mg düzeylerini yükseltmiştir. Bazı koşullarda Mg çoğunlukla kalsiyum ile rekabete girer ve özellikle Ca içeriği yüksek topraklarda Mg'un yıkanma riski artabilir. Ancak organik materyallerin sağladığı humik bileşikler, Mg'un kompleks formda tutulmasını kolaylaştırarak bu kaybı azaltabilir (Glaser ve ark., 2002).

Duncan testi sonuçları, tüm toprak reaksiyonlarında Mg düzeylerinin uygulamalara göre anlamlı şekilde değiştiğini ortaya koymuştur ( $p<0.05$ ). Özellikle vermikompost gübresi ve ahır gübresi katkılı fosforlu gübre kombinasyonları Mg mobilizasyonunda en etkin uygulamalar olarak öne çıkmıştır. Bu durum, toprak verimliliğini artırmak ve Mg eksikliklerine karşı sürdürülebilir çözümler üretmek açısından önemlidir.

Çizelge 4.25. İnkübasyon topraklarının ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | Mg (mg/kg) |          |           |
|------------------|------------|----------|-----------|
|                  | Asidik     | Nötr     | Bazik     |
| Kontrol          | 92.17 f    | 492.58 f | 600.02 f  |
| TSP              | 98.46 e    | 530.67 d | 645.83 d  |
| TSP+Biochar      | 98.52 e    | 534.50 d | 634.66 de |
| TSP+Vermikompost | 97.35 ef   | 500.27 f | 624.89 ef |
| TSP+AG           | 341.04 a   | 695.54 b | 805.00 a  |
| HKF              | 260.21 b   | 623.96 c | 686.96 c  |
| HKF+Biochar      | 112.02 d   | 517.27 e | 611.58 ef |
| HKF+Vermikompost | 344.38 a   | 726.25 a | 774.75 b  |
| HKF+AG           | 236.75 c   | 613.06 c | 705.84 c  |

#### 4.1.13. Toprakta alınabilir Fe analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

İnkübasyon çalışmasının toprakta Fe analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.26'da verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik ve nötr toprağın Fe içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bazik topraklarda ise kontrol grubunu orta derece değişkenlik gösterdiği ancak diğer tüm grupların düşük derece değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+AG grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, HKF grubunun normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP+Vermikompost ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, TSP+AG ve HKF gruplarının normal dağılım gösterdiği, diğer tüm grupların ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir. Bazik toprakta ise HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, yalnızca HKF grubunun normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre Fe'de normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.26).

Elde edilen sonuçlara göre asidik topraklarda, Fe'un çözünürlüğü genellikle yüksek olmasına rağmen, uygulamaların etkileri arasında anlamlı farklar oluşmuştur (Çizelge 4.27). En yüksek Fe değeri 87.89 mg/kg ile HKF+Vermikompost grubunda tespit edilmiştir ( $p<0.05$ ). Bu durum, vermikompostun mikrobiyal aktiviteyi artırarak organik asit salımı yoluyla Fe'un çözünürlüğünü teşvik ettiğini düşündürmektedir (Domínguez ve Edwards, 2011).

Buna karşılık kontrol grubundaki Fe düzeyi 50.98 mg/kg ile en düşük değeri göstermiştir. Bu durum, asit ortamda yeterli organik madde veya biyolojik aktivite olmaksızın Fe'un organik formlara ya da oksitlerine bağlanarak bitkilere yararlı formda geçiş yaptığını

Çizelge 4.26. İnkübasyon topraklarının alınabilir Fe analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Fe (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 47         | 53   | 50   | 2.75      | 7.59    | 5.50              | 0.40               | -0.18 |
|        | TSP              | 66         | 68   | 67   | 0.79      | 0.63    | 1.18              | -1.03              | 1.92  |
|        | TSP+Biochar      | 68         | 89   | 78   | 8.39      | 70.47   | 10.76             | 0.40               | 1.58  |
|        | TSP+Vermikompost | 57         | 68   | 63   | 4.53      | 20.55   | 7.19              | -0.99              | 0.41  |
|        | TSP+AG           | 63         | 65   | 64   | 1.30      | 1.70    | 2.03              | 1.87               | 3.63  |
|        | HKF              | 59         | 71   | 66   | 5.37      | 28.87   | 8.14              | -0.19              | -2.58 |
|        | HKF+Biochar      | 69         | 80   | 74   | 4.70      | 22.15   | 6.35              | 1.08               | 1.98  |
|        | HKF+Vermikompost | 86         | 89   | 87   | 1.48      | 2.20    | 1.70              | 0.39               | 1.48  |
|        | HKF+AG           | 79         | 82   | 81   | 1.55      | 2.43    | 1.91              | -1.07              | 1.84  |
| Nötr   | Kontrol          | 2.02       | 2.20 | 2.10 | 0.09      | 0.01    | 4.29              | 0.16               | -5.11 |
|        | TSP              | 4.08       | 4.92 | 4.50 | 0.38      | 0.14    | 8.44              | 0.05               | -2.72 |
|        | TSP+Biochar      | 3.86       | 3.92 | 3.89 | 0.03      | 0.00    | 0.77              | 1.12               | 2.23  |
|        | TSP+Vermikompost | 2.24       | 2.68 | 2.47 | 0.19      | 0.04    | 7.69              | -0.11              | -2.16 |
|        | TSP+AG           | 3.82       | 4.32 | 4.04 | 0.21      | 0.04    | 5.20              | 0.81               | 1.50  |
|        | HKF              | 3.82       | 3.98 | 3.94 | 0.08      | 0.01    | 2.03              | -1.91              | 3.68  |
|        | HKF+Biochar      | 2.08       | 2.18 | 2.14 | 0.05      | 0.00    | 2.34              | -0.12              | -5.29 |
|        | HKF+Vermikompost | 3.68       | 3.96 | 3.81 | 0.15      | 0.02    | 3.94              | 0.14               | -5.18 |
|        | HKF+AG           | 3.34       | 3.64 | 3.48 | 0.13      | 0.02    | 3.74              | 0.44               | 0.54  |
| Bazik  | Kontrol          | 1.12       | 1.92 | 1.61 | 0.35      | 0.12    | 21.74             | -1.32              | 1.62  |
|        | TSP              | 2.26       | 2.58 | 2.43 | 0.13      | 0.02    | 5.35              | -0.66              | 1.63  |
|        | TSP+Biochar      | 2.94       | 3.74 | 3.38 | 0.34      | 0.12    | 10.06             | -0.66              | -0.04 |
|        | TSP+Vermikompost | 3.53       | 4.04 | 3.81 | 0.21      | 0.04    | 5.51              | -0.69              | 1.76  |
|        | TSP+AG           | 4.10       | 4.62 | 4.41 | 0.22      | 0.05    | 4.99              | -1.01              | 0.28  |
|        | HKF              | 3.30       | 3.72 | 3.44 | 0.19      | 0.04    | 5.52              | 1.60               | 2.48  |
|        | HKF+Biochar      | 2.50       | 2.90 | 2.67 | 0.19      | 0.04    | 7.12              | 0.42               | -3.51 |
|        | HKF+Vermikompost | 2.72       | 3.58 | 3.08 | 0.41      | 0.17    | 13.31             | 0.42               | -3.54 |
|        | HKF+AG           | 2.48       | 2.36 | 2.86 | 0.38      | 0.15    | 13.29             | 0.68               | -0.94 |

göstermektedir (Loeppert ve Inskeep, 1996). Nötr topraklarda alınabilir Fe miktarı genellikle daha düşüktür, ancak TSP uygulamasıyla 4.50 mg/kg ile en yüksek değer elde edilmiştir. Elde edilen bu değer, mineral gübrenin pH'yı hafif asidik olacak şekilde etkilemesiyle Fe çözünürlüğünü geçici olarak artırdığına işaret edebilir. Organik katkılarla yapılan uygulamalarda (örneğin TSP+AG, HKF+AG) Fe düzeyinin 3.5–4.0 mg/kg bandında olduğu görülmüş ve kontrol grubuna kıyasla anlamlı artışlar sağlamıştır ( $p<0.05$ ). Biochar uygulanan gruplarda (HKF+Biochar), Fe değerinin düşük kalması (2.14 mg/kg), biocharın yüzey özellikleri nedeniyle Fe'yi kompleksleştirme veya bağlama potansiyelini göstermektedir (Glaser ve ark., 2002). Ayrıca pH üzerindeki tamponlama etkisi, Fe'un alınabilirliğini sınırlamış olabilir (Lehmann ve Joseph, 2015). Bazı topraklarda Fe çözünürlüğü genellikle sınırlıdır. Bu bağlamda, en yüksek Fe değeri TSP+AG uygulamasıyla 4.41 mg/kg olarak tespit edilmiştir. Bu etki, ahır gübresinin içerdiği organik asitler sayesinde pH'yı dar bir alanda da olsa düşürerek Fe çözünürlüğünü artırmasından kaynaklanabilir (Tejada ve Benítez, 2006). Kontrol grubu 1.62 mg/kg gibi oldukça düşük bir değerle, bazı koşullarda Fe'un bitkiler için neredeyse kullanılamaz hale geldiğini ortaya koymuştur. Bu özellikle kireçli ve alkali topraklarda yaygın görülen Fe eksikliğinin (kloroz) temel nedenlerinden biridir (Abadía ve ark., 2006). Biochar, Fe üzerinde genellikle olumsuz etkiler göstermektedir, dolayısıyla Fe eksikliği riski bulunan bölgelerde oldukça dikkatli kullanılmalıdır.

Çizelge 4.27. İnkübasyon topraklarının alınabilir Fe analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Fe (mg/kg) |        |         |
|------------------|------------|--------|---------|
|                  | Asidik     | Nötr   | Bazik   |
| Kontrol          | 50.98 f    | 2.10 e | 1.62 e  |
| TSP              | 67.86 d    | 4.50 a | 2.44 e  |
| TSP+Biochar      | 78.37 bc   | 3.89 b | 3.39 bc |
| TSP+Vermikompost | 63.81 d    | 2.47 d | 3.81 b  |
| TSP+AG           | 63.94 d    | 4.04 b | 4.41 a  |
| HKF              | 65.56 d    | 3.94 b | 3.44 bc |
| HKF+Biochar      | 74.12 c    | 2.14 e | 2.67 de |
| HKF+Vermikompost | 87.89 a    | 3.81 b | 3.09 cd |
| HKF+AG           | 81.17 b    | 3.48 c | 2.86 de |

#### 4.1.14. Toprakta alınabilir Zn analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının Zn analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.28’de verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprakta kontrol grubu orta derece değişkenlik gösterirken diğer gruplar düşük derece değişkenlik göstermiştir. Nötr topraklarda yalnızca TSP grubu orta derece değişkenlik gösterirken diğer gruplar düşük derece değişkenlik göstermiştir. Bazik topraklara baktığımızda ise, yalnızca HKF+AG grubunun orta derece değişkenlik gösterdiği diğer grupların ise düşük derece değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta Kontrol, TSP+AG ve HKF+Biochar gruplarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Biochar ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise yalnızca TSP+AG ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise yalnızca kontrol grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, HKF, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre Zn’nun normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.28).

Asidik toprakta en yüksek alınabilir Zn değeri 3.78 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ) (Çizelge 4.29). Elde edilen bu değer, vermikompostun Zn mobilizasyonunu artırıcı yönde etki ettiğini göstermektedir. Vermikompost, Zn’un bağlandığı organik kompleksleri çözerek metalin bitkilere daha yararışlı hale gelmesini sağlayabilir (Domínguez ve Edwards, 2011). Buna ek olarak, düşük pH koşulları Zn’un çözünürlüğünü artırarak alınabilir fraksiyonun yükselmesine neden olmaktadır (Kabata-Pendias ve Mukherjee, 2007). Kontrol grubunda Zn düzeyi 1.42 mg/kg ile en düşük seviyede kalmıştır. Bu toprakta Zn’un çözünürlüğünün organik katkı ve mikrobiyal aktivite olmadan oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. Nötr

Çizelge 4.28. İnkübasyon topraklarının alınabilir Zn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Zn (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 1.42       | 2.04 | 1.71 | 0.33      | 0.10    | 19.30             | 0.04               | -5.69 |
|        | TSP              | 2.08       | 2.30 | 2.19 | 0.09      | 0.01    | 4.11              | -0.23              | -1.51 |
|        | TSP+Biochar      | 2.24       | 2.48 | 2.34 | 0.10      | 0.01    | 4.27              | 1.12               | 2.22  |
|        | TSP+Vermikompost | 1.70       | 2.18 | 1.97 | 0.20      | 0.04    | 10.15             | -0.96              | 1.64  |
|        | TSP+AG           | 2.98       | 3.72 | 3.31 | 0.35      | 0.12    | 10.57             | 0.29               | -4.09 |
|        | HKF              | 2.22       | 2.84 | 2.58 | 0.26      | 0.06    | 10.08             | -1.19              | 2.30  |
|        | HKF+Biochar      | 1.92       | 2.18 | 2.05 | 0.13      | 0.02    | 6.34              | -0.05              | -5.45 |
|        | HKF+Vermikompost | 3.66       | 3.98 | 3.77 | 0.14      | 0.02    | 3.71              | 1.32               | 1.17  |
|        | HKF+AG           | 2.24       | 2.78 | 2.45 | 0.24      | 0.06    | 9.80              | 0.95               | -0.57 |
| Nötr   | Kontrol          | 0.56       | 0.64 | 0.60 | 0.03      | 0.00    | 5.00              | 0.75               | 0.34  |
|        | TSP              | 0.60       | 0.88 | 0.77 | 0.12      | 0.02    | 15.58             | -1.07              | 1.17  |
|        | TSP+Biochar      | 0.58       | 0.62 | 0.61 | 0.02      | 0.00    | 3.28              | -0.86              | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 0.56       | 0.64 | 0.61 | 0.03      | 0.00    | 4.92              | -0.75              | 0.34  |
|        | TSP+AG           | 2.42       | 3.06 | 2.79 | 0.32      | 0.10    | 11.47             | -0.33              | -4.09 |
|        | HKF              | 1.76       | 1.80 | 1.78 | 0.02      | 0.00    | 1.12              | -0.86              | -1.29 |
|        | HKF+Biochar      | 0.72       | 0.82 | 0.77 | 0.05      | 0.00    | 6.49              | 0.12               | -5.29 |
|        | HKF+Vermikompost | 2.88       | 3.36 | 3.19 | 0.22      | 0.05    | 6.90              | -1.17              | 0.37  |
|        | HKF+AG           | 1.72       | 1.88 | 1.80 | 0.07      | 0.01    | 3.89              | 0.32               | -1.60 |
| Bazik  | Kontrol          | 0.20       | 0.23 | 0.21 | 0.01      | 0.00    | 4.76              | 0.37               | -3.90 |
|        | TSP              | 0.24       | 0.28 | 0.25 | 0.02      | 0.00    | 8.00              | 0.85               | -1.28 |
|        | TSP+Biochar      | 0.22       | 0.30 | 0.26 | 0.03      | 0.00    | 11.54             | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.22       | 0.32 | 0.28 | 0.04      | 0.00    | 14.29             | -0.71              | 1.78  |
|        | TSP+AG           | 1.60       | 1.68 | 1.64 | 0.03      | 0.00    | 1.83              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF              | 0.92       | 1.16 | 1.06 | 0.10      | 0.01    | 9.43              | -1.32              | 2.37  |
|        | HKF+Biochar      | 0.25       | 0.28 | 0.26 | 0.01      | 0.00    | 3.85              | 1.12               | 2.22  |
|        | HKF+Vermikompost | 1.22       | 1.76 | 1.50 | 0.22      | 0.05    | 14.67             | -0.13              | 1.34  |
|        | HKF+AG           | 0.80       | 1.26 | 1.08 | 0.19      | 0.04    | 17.59             | -1.34              | 2.20  |

toprak koşullarında Zn düzeyinin en yüksek olduğu uygulama HKF+Vermikompost (3.19 mg/kg) olmuş, bunu TSP+AG (2.79 mg/kg) ve HKF+AG (1.80 mg/kg) uygulamaları takip etmiştir ( $p<0.05$ ). Bu sonuçlar, mikrobiyal olarak aktif materyallerin Zn'un mobilizasyonunu nötr pH koşullarında da artırabildiğini göstermektedir. Özellikle organik asit salınımı yoluyla Zn'un metal-organik komplekslerinden ayrıştırılması bu sonucu desteklemektedir (García-Gil ve ark., 2000). Düşük Zn seviyeleri ise mineral gübre (TSP) ve biochar katkılı uygulamalarda gözlenmiştir. Bu durum, biocharın Zn'un toprakta bağlandığı fraksiyonları stabilize etmesiyle ilişkili olabilir (Beesley ve ark., 2011). Bazık topraklarda alınabilir Zn değerleri genel olarak daha düşük seyretmiş, ancak TSP+AG (164 mg/kg) ve HKF+Vermikompost (1.50 mg/kg) uygulamaları diğerlerine göre anlamlı düzeyde yüksek sonuçlar vermiştir ( $p<0.05$ ). Bu durum, yüksek pH nedeniyle Zn'un çözünürlüğünün azaldığı ortamlarda bile, organik materyallerin Zn'un şelatlanarak mobilizasyonunu artırabileceğini göstermektedir (Alloway, 2008).

HKF+Vermikompost uygulaması her üç toprak türünde de en yüksek veya ikinci yüksek Zn seviyelerine ulaşmış, bu nedenle çinko yetersizliğinin yaygın olduğu sistemlerde uygulanabilir bir kombinasyon olarak öne çıkmaktadır. Biochar uygulamaları özellikle Zn açısından kısa vadede sınırlandırıcı etkiler göstermiş, bu nedenle düşük Zn içeriğine sahip topraklarda yalnız başına uygulanması önerilmemektedir.

Çizelge 4.29. İnkübasyon topraklarının alınabilir Zn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Zn (mg/kg) |        |        |
|------------------|------------|--------|--------|
|                  | Asidik     | Nötr   | Bazık  |
| Kontrol          | 1.42 g     | 0.60 d | 0.21 c |
| TSP              | 2.20 def   | 0.77 d | 0.26 c |
| TSP+Biochar      | 2.34 cde   | 0.61 d | 0.26 c |
| TSP+Vermikompost | 1.98 fg    | 0.61 d | 0.28 c |
| TSP+AG           | 3.31 b     | 2.79 b | 1.64 a |
| HKF              | 2.59 c     | 1.79 c | 1.07 b |
| HKF+Biochar      | 2.06 efg   | 0.77 d | 0.26 c |
| HKF+Vermikompost | 3.78 a     | 3.19 a | 1.50 a |
| HKF+AG           | 2.45 cd    | 1.80 c | 1.08 b |

#### 4.1.15. Toprakta alınabilir Cu analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının Cu analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.30'da verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik toprağın Cu içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+Biochar, TSP+Vermikompost ve TSP+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise Kontrol, TSP+Biochar ve TSP+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, yalnızca HKF grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise yalnızca TSP+Biochar, grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, Kontrol ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre Cu'da normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprağın uygulamalarının sonuçları incelendiğinde de Cu'nun normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.30).

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, asidik toprakta en yüksek alınabilir Cu düzeyinin 2.15 mg/kg ile HKF+AG uygulamasında, bunu takiben 2.10 mg/kg ile sadece HKF uygulamasında olduğu tespit edilmiştir ( $p<0.05$ ) (Çizelge 4.31). Bu bulgular, hem mineral kaynaklı fosfat katkısının hem de ahır gübresi gibi yüksek organik madde içeren materyallerin Cu'un mobilizasyonuna katkı sağladığını göstermektedir. Organik materyaller, özellikle humik ve fulvik asitler aracılığıyla Cu'u şelatlayarak çözeltildeki yarıyışlılığının artmasını sağlar (McBride, 1994; Stevenson ve Fitch, 1986). Nötr toprak koşullarında en yüksek alınabilir Cu değerleri, 2.01 mg/kg ile HKF, 1.98 mg/kg ile TSP ve 1.94 mg/kg ile HKF+AG uygulamalarında kaydedilmiştir. Fosforlu gübrelerin ve organik materyallerin birlikte kullanımının pozitif etkisinin Cu'un alınabilirliğini artırabileceğini göstermektedir. Nötr pH, metal iyonlarının çözünürlüğü açısından optimum aralığı sağlayabilirken, bu pH değerinde organik maddenin şelatlama

Çizelge 4.30. İnkübasyon topraklarının alınabilir Cu analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Cu (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 1.04       | 1.14 | 1.09 | 0.04      | 0.00    | 3.67              | 0.00               | 0.39  |
|        | TSP              | 1.80       | 1.84 | 1.82 | 0.02      | 0.00    | 1.10              | -0.85              | -1.28 |
|        | TSP+Biochar      | 2.04       | 2.06 | 2.05 | 0.01      | 0.00    | 0.49              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+Vermikompost | 1.60       | 1.66 | 1.63 | 0.03      | 0.00    | 1.84              | -1.13              | 2.22  |
|        | TSP+AG           | 1.40       | 2.04 | 1.85 | 0.30      | 0.09    | 16.22             | -1.93              | 3.76  |
|        | HKF              | 1.94       | 2.18 | 2.09 | 0.11      | 0.01    | 5.26              | -1.46              | 1.90  |
|        | HKF+Biochar      | 2.02       | 2.06 | 2.03 | 0.02      | 0.00    | 0.99              | 0.85               | -1.29 |
|        | HKF+Vermikompost | 2.04       | 2.08 | 2.05 | 0.02      | 0.00    | 0.98              | 0.85               | -1.29 |
|        | HKF+AG           | 1.80       | 2.40 | 2.15 | 0.28      | 0.08    | 13.02             | -0.56              | -2.67 |
| Nötr   | Kontrol          | 1.20       | 1.26 | 1.24 | 0.03      | 0.00    | 2.42              | -1.13              | 2.23  |
|        | TSP              | 1.84       | 2.12 | 1.98 | 0.12      | 0.01    | 6.06              | 0.00               | 0.91  |
|        | TSP+Biochar      | 1.78       | 1.84 | 1.81 | 0.03      | 0.00    | 1.66              | 1.13               | 2.23  |
|        | TSP+Vermikompost | 1.76       | 1.80 | 1.79 | 0.02      | 0.00    | 1.12              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+AG           | 1.78       | 1.82 | 1.80 | 0.02      | 0.00    | 1.11              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF              | 1.94       | 2.08 | 2.01 | 0.07      | 0.00    | 3.48              | 0.23               | -3.86 |
|        | HKF+Biochar      | 1.78       | 1.82 | 1.80 | 0.02      | 0.00    | 1.11              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF+Vermikompost | 1.80       | 1.84 | 1.82 | 0.02      | 0.00    | 1.10              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF+AG           | 1.82       | 2.06 | 1.94 | 0.10      | 0.01    | 5.15              | 0.26               | -0.10 |
| Bazik  | Kontrol          | 2.66       | 2.78 | 2.70 | 0.05      | 0.00    | 1.85              | 1.81               | 3.48  |
|        | TSP              | 3.64       | 3.68 | 3.66 | 0.02      | 0.00    | 0.55              | -0.85              | -1.28 |
|        | TSP+Biochar      | 3.66       | 3.68 | 3.67 | 0.01      | 0.00    | 0.27              | 0.00               | -6.00 |
|        | TSP+Vermikompost | 3.44       | 3.48 | 3.45 | 0.02      | 0.00    | 0.58              | 0.85               | -1.28 |
|        | TSP+AG           | 3.66       | 3.70 | 3.68 | 0.02      | 0.00    | 0.54              | -0.85              | -1.28 |
|        | HKF              | 3.92       | 4.02 | 3.95 | 0.04      | 0.00    | 1.01              | 1.19               | 0.43  |
|        | HKF+Biochar      | 3.50       | 3.52 | 3.51 | 0.01      | 0.00    | 0.28              | -2.00              | 4.00  |
|        | HKF+Vermikompost | 3.32       | 3.80 | 3.54 | 0.19      | 0.04    | 5.37              | 0.45               | 1.56  |
|        | HKF+AG           | 3.60       | 3.88 | 3.72 | 0.12      | 0.02    | 3.23              | 0.55               | -1.10 |

potansiyeli de maksimum düzeyde etkili olabilmektedir (Kabata-Pendias ve Mukherjee, 2007). Düşük Cu düzeyleri, kontrol (1.24 mg/kg) ve bazı TSP+Biochar veya vermikompost uygulamalarında (1.79–1.81 mg/kg) gözlenmiş olup bu durumun, biocharın kısa vadede Cu bağlayıcı etkisinden kaynaklanıyor olabileceğini, bazı vermikompost uygulamalarında ise organik asit üretiminin Cu çözünürlüğünü her zaman artırmadığını düşündürmektedir (Beesley ve ark., 2011; Glaser ve ark., 2002). Bazı topraklarda genel olarak metal çözünürlüğünün düştüğü bilinmekle birlikte, bazı uygulamalar bu sınırlamayı aşabilmiştir. En yüksek Cu değeri 3.96 mg/kg ile HKF uygulamasında görülmüştür. Mineral fosfatın Ca ile birlikte çözünür Cu bileşiklerinin oluşumunu destekleyebileceğini düşündürmektedir (Lindsay ve Norvell, 1978). Bunu sırasıyla 3.73–3.69 mg/kg ile HKF+AG ve TSP+AG uygulamaları takip etmiştir. Kontrol grubu, 2.70 mg/kg gibi nispeten düşük bir değere sahiptir ve bu, bazı ortamlarda Cu'un çözünürlüğünün zayıf olduğunu ve organik katkılar olmadan alınabilirliğin kısıtlandığını göstermektedir. Bazı ortamda organik madde katkısı, Cu'un kararlı kompleksler halinde çözeltide kalmasını sağlayarak bitki yarayışlılığını artırabilir (McGrath ve ark., 1988).

Çizelge 4.31. İnkübasyon topraklarının alınabilir Cu analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Cu mg/kg |        |        |
|------------------|----------|--------|--------|
|                  | Asidik   | Nötr   | Bazik  |
| Kontrol          | 1.14 d   | 1.24 c | 2.70 d |
| TSP              | 1.83 bc  | 1.98 a | 3.67 b |
| TSP+Biochar      | 2.06 ab  | 1.81 b | 3.67 b |
| TSP+Vermikompost | 1.64 c   | 1.79 b | 3.46 c |
| TSP+AG           | 1.85 bc  | 1.80 b | 3.69 b |
| HKF              | 2.10 a   | 2.01 a | 3.96 a |
| HKF+Biochar      | 2.04 ab  | 1.80 b | 3.52 c |
| HKF+Vermikompost | 2.06 ab  | 1.82 b | 3.55 c |
| HKF+AG           | 2.15 a   | 1.94 a | 3.73 b |

#### 4.1.16. Toprakta alınabilir Mn analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının Mn analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.32’de verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik ve nötr toprağın Mn içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Fakat bazik topraklarda ise Kontrol ve HKF+AG gruplarının orta derece değişkenlik gösterdiği diğer grupların ise düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır .

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP+Vermikompost, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise yalnızca HKF grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, Kontrol, TSP, TSP+Biochar, TSP+AG, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının normal dağılım gösterdiği ve diğer gruplarının ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre Mn’da normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.32).

Asidik toprak koşullarında, en yüksek Mn değeri 47.22 mg/kg ile TSP uygulamasında saptanmıştır ( $p < 0.05$ ) (Çizelge 4.33). Düşük pH’nın Mn’un redüksiyonunu teşvik ederek  $Mn^{2+}$  formunun çözeltide birikmesine neden olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, asidik koşullarda Mn’un yüksek çözünürlüğü bilinmektedir (Kabata-Pendias ve Mukherjee, 2007). Kontrol grubundaki Mn değeri yalnızca 8.82 mg/kg olup, Mn’un doğal olarak toprakta sabit ve alınamaz formlarda bulunduğunu ve dış katkılarla mobilizasyonunun teşvik edildiğini göstermektedir. İlginç bir şekilde, ahır gübresiyle yapılan TSP+AG uygulamasında Mn değerinin yalnızca 10.50 mg/kg olması, organik materyalin asidik ortamda Mn’un şelatlanması yoluyla çözeltiden uzaklaştırılabileceğini düşündürmektedir (McBride, 1994). Nötr toprakta en yüksek Mn düzeyi 19.62 mg/kg ile HKF uygulamasında ölçülmüştür. Bu durum, HKF’nin doğal Mn içeriği ve topraktaki çözünürlüğü sayesinde Mn’un doğrudan toprak çözeltisine salındığını göstermektedir.

Çizelge 4.32. İnkübasyon topraklarının alınabilir Mn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Mn (mg/kg) |       |       |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|-------|-------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max.  | Ort.  | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 8.20       | 8.82  | 8.55  | 0.26      | 0.07    | 3.04              | -0.96              | 1.61  |
|        | TSP              | 41.74      | 51.30 | 47.21 | 4.02      | 16.15   | 8.52              | -0.96              | 1.57  |
|        | TSP+Biochar      | 36.96      | 37.22 | 37.11 | 0.11      | 0.01    | 0.30              | -0.93              | 0.78  |
|        | TSP+Vermikompost | 27.66      | 31.26 | 29.16 | 1.53      | 2.34    | 5.25              | 1.05               | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 10.14      | 11.06 | 10.50 | 0.40      | 0.16    | 3.81              | 1.24               | 1.50  |
|        | HKF              | 11.24      | 13.80 | 12.65 | 1.12      | 1.25    | 8.85              | -0.52              | -1.17 |
|        | HKF+Biochar      | 24.76      | 25.08 | 25.08 | 0.30      | 0.09    | 1.20              | 0.05               | -3.79 |
|        | HKF+Vermikompost | 18.56      | 19.30 | 19.01 | 0.35      | 0.13    | 1.84              | -0.64              | -2.43 |
|        | HKF+AG           | 9.26       | 10.52 | 9.83  | 0.54      | 0.29    | 5.49              | 0.51               | -0.87 |
| Nötr   | Kontrol          | 5.62       | 6.44  | 6.11  | 0.35      | 0.12    | 5.73              | -1.11              | 1.39  |
|        | TSP              | 9.60       | 9.92  | 9.72  | 0.14      | 0.02    | 1.44              | 1.33               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 8.94       | 9.24  | 9.08  | 0.13      | 0.02    | 1.43              | 0.44               | 0.54  |
|        | TSP+Vermikompost | 7.12       | 8.82  | 8.18  | 0.74      | 0.55    | 9.05              | -1.41              | 2.17  |
|        | TSP+AG           | 7.26       | 10.12 | 8.90  | 1.28      | 1.65    | 14.38             | -0.67              | -1.46 |
|        | HKF              | 19.52      | 19.72 | 19.62 | 0.08      | 0.01    | 0.41              | 0.29               | -0.68 |
|        | HKF+Biochar      | 6.92       | 8.04  | 7.59  | 0.47      | 0.22    | 6.19              | -1.24              | 2.38  |
|        | HKF+Vermikompost | 6.88       | 8.60  | 7.64  | 0.74      | 0.55    | 9.69              | 0.68               | -0.60 |
|        | HKF+AG           | 7.54       | 8.48  | 7.87  | 0.42      | 0.17    | 5.34              | 1.65               | 3.00  |
| Bazik  | Kontrol          | 1.98       | 3.00  | 2.43  | 0.42      | 0.18    | 17.28             | 0.79               | 1.36  |
|        | TSP              | 3.60       | 3.68  | 3.64  | 0.03      | 0.00    | 0.82              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 4.56       | 5.46  | 5.07  | 0.38      | 0.14    | 7.50              | -0.88              | 0.79  |
|        | TSP+Vermikompost | 4.60       | 4.72  | 4.67  | 0.05      | 0.00    | 1.07              | -1.44              | 2.23  |
|        | TSP+AG           | 6.40       | 6.50  | 6.45  | 0.04      | 0.00    | 0.62              | -0.48              | -1.70 |
|        | HKF              | 6.40       | 6.52  | 6.45  | 0.06      | 0.00    | 0.93              | 0.37               | -3.90 |
|        | HKF+Biochar      | 4.52       | 4.60  | 4.56  | 0.03      | 0.00    | 0.66              | -0.75              | 0.34  |
|        | HKF+Vermikompost | 5.12       | 6.00  | 5.47  | 0.37      | 0.14    | 6.76              | 1.27               | 2.05  |
|        | HKF+AG           | 2.52       | 6.20  | 4.53  | 1.52      | 2.33    | 33.55             | -0.63              | 1.26  |

Aynı zamanda, fosforlu gübrelerin bazı durumlarda Mn alımını baskılayabileceği bildirilse de bu çalışmada bu tür bir etki gözlemlenmemiştir (Fageria ve ark., 2002). Düşük Mn değerleri kontrol (6.11 mg/kg), HKF+Biochar (7.59 mg/kg) ve HKF+AG (7.88 mg/kg) uygulamalarında kaydedilmiş, bu da biocharın kısa vadede Mn'un çözünürlüğünü azaltabileceğini, ahır gübresinin ise Mn'un organik komplekslerle şelat yaparak çözültiden uzaklaştırılmasına neden olabileceğini göstermektedir (Beesley ve ark., 2011; Glaser ve ark., 2002). Bazik toprakta en yüksek Mn değerleri HKF (6.45 mg/kg) ve TSP+AG (6.46 mg/kg) uygulamalarında elde edilmiştir. Yüksek pH'nın Mn'un oksitlenerek alınamaz  $Mn^{4+}$  formuna dönüşmesine rağmen, bu iki uygulamanın Mn mobilizasyonunu sürdürebildiğini göstermektedir. Özellikle organik materyallerin (ahır gübresi gibi), mikrobiyal solunum sonucu düşük redoks potansiyeli oluşturarak Mn oksitlerin çözünmesine katkı sağladığı bilinmektedir (Hue, 1992). Kontrol grubunda Mn değeri yalnızca 2.43 mg/kg olarak ölçülmüş ve bu durum, Mn'un bazik koşullarda çoğunlukla sabit formlarda bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca biochar ve vermikompost katkılı uygulamaların Mn alınabilirliğinde görece daha düşük değerler üretmesi, bu materyallerin Mn'un çözültideki formunu kısa vadede sınırlandırabileceğini göstermektedir. Biochar, Mn'un şelatlanmasını veya yüzeye bağlanmasını sağlayarak alınabilirliğini kısa vadede azaltabilir. Ancak uzun vadeli toprak iyileştirmelerinde bu etkiler yeniden değerlendirilmelidir (Lehmann ve Joseph, 2024).

Çizelge 4.33. İnkübasyon topraklarının alınabilir Mn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Mn (mg/kg) |         |         |
|------------------|------------|---------|---------|
|                  | Asidik     | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 8.82 g     | 6.11 e  | 2.43 e  |
| TSP              | 47.22 a    | 9.72 b  | 3.64 d  |
| TSP+Biochar      | 37.11 b    | 9.08 bc | 5.08 bc |
| TSP+Vermikompost | 29.16 c    | 8.18 cd | 4.68 bc |
| TSP+AG           | 10.50 fg   | 8.90 bc | 6.46 a  |
| HKF              | 12.65 f    | 19.62 a | 6.45 a  |
| HKF+Biochar      | 25.09 d    | 7.59 d  | 4.57 c  |
| HKF+Vermikompost | 19.01 e    | 7.64 d  | 5.47 b  |
| HKF+AG           | 9.83 g     | 7.88 d  | 4.53 c  |

#### 4.1.17. Toprakta alınabilir B analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasında toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik toprağın B içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.34).

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, TSP+AG ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, yalnızca HKF+Biochar grubunun normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP+Solucan, TSP+AG, HKF, HKF+Vermikompost ve Ögt. Fosfat+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, TSP+Biochar ve HKF+Biochar grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu ve yalnızca kontrol grubunun normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise Kontrol ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Vermikompost ve TSP+AG gruplarının normal dağılım gösterdiği ve diğer grupların ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre B'da normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.34).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki B içeriğinde anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.35). Asidik toprak koşullarında en yüksek B konsantrasyonu 1.29 mg/kg ile HKF ve HKF+AG uygulamalarında tespit edilmiştir. Organik asitlerin B ile kompleks oluşturma eğilimi, çözünürlük ve alınabilirliği artırmaktadır (Shorrocks, 1997). Kontrol, TSP, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost ve HKF+Biochar gruplarında B düzeyleri 0.50–0.60 mg/kg aralığında kalmıştır ( $p<0.05$ ). Bu değerler, yalnızca mineral gübre veya biochar uygulamalarının B açısından sınırlı etki gösterdiğini ve özellikle asidik ortamlarda bor adsorpsiyonunun fazla olabileceğini göstermektedir. Çünkü düşük pH'da bor, kil mineralleri ve oksitlerle daha fazla adsorbe olabilmektedir (Goldberg ve ark., 2000). Nötr toprak koşullarında en yüksek B düzeyleri HKF (0.96 mg/kg) ve HKF+AG (0.91 mg/kg) uygulamalarında elde edilmiştir. Elde

Çizelge 4.34. İnkübasyon topraklarının alınabilir B analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | B (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|-----------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.      | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 0.45      | 0.55 | 0.50 | 0.04      | 0.00    | 8.00              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP              | 0.55      | 0.65 | 0.60 | 0.04      | 0.00    | 6.67              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 0.50      | 0.55 | 0.54 | 0.02      | 0.00    | 3.70              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.50      | 0.55 | 0.54 | 0.02      | 0.00    | 3.70              | -1.77              | 3.13  |
|        | TSP+AG           | 0.85      | 1.00 | 0.91 | 0.06      | 0.00    | 6.59              | 1.13               | 2.22  |
|        | HKF              | 1.10      | 1.50 | 1.29 | 0.16      | 0.03    | 12.40             | 0.44               | 1.17  |
|        | HKF+Biochar      | 0.55      | 0.60 | 0.58 | 0.02      | 0.00    | 3.45              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF+Vermikompost | 0.95      | 1.15 | 1.06 | 0.08      | 0.01    | 7.55              | -0.75              | 0.34  |
|        | HKF+AG           | 1.20      | 1.50 | 1.29 | 0.14      | 0.02    | 10.85             | 1.85               | 3.41  |
| Nötr   | Kontrol          | 0.50      | 0.52 | 0.51 | 0.01      | 0.00    | 1.96              | 0.86               | -1.29 |
|        | TSP              | 0.50      | 0.55 | 0.52 | 0.03      | 0.00    | 5.77              | 0.54               | -2.94 |
|        | TSP+Biochar      | 0.50      | 0.55 | 0.53 | 0.03      | 0.00    | 5.66              | -0.54              | -2.94 |
|        | TSP+Vermikompost | 0.55      | 0.60 | 0.56 | 0.03      | 0.00    | 5.36              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP+AG           | 0.60      | 0.65 | 0.64 | 0.03      | 0.00    | 4.69              | -2.00              | 4.00  |
|        | HKF              | 0.90      | 1.05 | 0.96 | 0.06      | 0.00    | 6.25              | 1.13               | 2.22  |
|        | HKF+Biochar      | 0.50      | 0.65 | 0.56 | 0.08      | 0.01    | 14.29             | 0.37               | -3.90 |
|        | HKF+Vermikompost | 0.60      | 0.65 | 0.61 | 0.03      | 0.00    | 4.92              | 2.00               | 4.00  |
|        | HKF+AG           | 0.90      | 0.95 | 0.91 | 0.03      | 0.00    | 3.30              | 2.00               | 4.00  |
| Bazik  | Kontrol          | 2.00      | 2.25 | 2.12 | 0.14      | 0.02    | 6.60              | 0.00               | -6.00 |
|        | TSP              | 2.45      | 2.55 | 2.52 | 0.05      | 0.00    | 1.98              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+Biochar      | 2.50      | 2.55 | 2.53 | 0.02      | 0.00    | 0.79              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+Vermikompost | 2.50      | 2.60 | 2.55 | 0.04      | 0.00    | 1.57              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 2.50      | 2.60 | 2.55 | 0.04      | 0.00    | 1.57              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF              | 3.00      | 3.05 | 3.01 | 0.02      | 0.00    | 0.66              | 2.00               | 4.00  |
|        | HKF+Biochar      | 2.40      | 2.50 | 2.42 | 0.05      | 0.00    | 2.07              | 2.00               | 4.00  |
|        | HKF+Vermikompost | 2.55      | 2.60 | 2.57 | 0.02      | 0.00    | 0.78              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF+AG           | 3.05      | 3.10 | 3.06 | 0.02      | 0.00    | 0.65              | 2.00               | 4.00  |

edilen bu sonuçlar, mineral fosfat kaynaklarının organik materyallerle birlikte uygulanmasının pozitif etkisini ortaya koymaktadır. Buna karşılık kontrol ve TSP tabanlı uygulamalarda B düzeyleri düşük kalmış; bu da bor içeriği düşük olan gübrelerin tek başına yeterli olmayabileceğini göstermektedir. Bazı topraklarda alınabilir B miktarları genelde yüksek seyretmiş, en yüksek düzeyler 3.05 mg/kg ile HKF+AG ve 3.01 mg/kg ile HKF uygulamalarında gözlenmiştir ( $p<0.05$ ). Bu yüksek değerler, borun yüksek pH'da çözünürlüğünün artması ve organik asit salınımı yoluyla çözültide tutulmasının artması ile açıklanabilir (Gupta, 1993). Bazı biochar uygulamalarında bor düzeyleri düşmüş olup bu durum, biocharın yüzeyinde bor adsorpsiyonuna neden olabileceğini göstermektedir (Beesley ve ark., 2011).

Çizelge 4.35. İnkübasyon topraklarının alınabilir B analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | B (mg/kg) |         |        |
|------------------|-----------|---------|--------|
|                  | Asidik    | Nötr    | Bazik  |
| Kontrol          | 0.50 d    | 0.50 d  | 2.13 d |
| TSP              | 0.60 d    | 0.52 d  | 2.55 b |
| TSP+Biochar      | 0.54 d    | 0.53 d  | 2.54 b |
| TSP+Vermikompost | 0.54 d    | 0.56 cd | 2.55 b |
| TSP+AG           | 0.91 c    | 0.63 b  | 2.55 b |
| HKF              | 1.29 a    | 0.96 a  | 3.01 a |
| HKF+Biochar      | 0.58 d    | 0.56 cd | 2.43 c |
| HKF+Vermikompost | 1.06 b    | 0.61 bc | 2.58 b |
| HKF+AG           | 1.29 a    | 0.91 a  | 3.05 a |

#### 4.1.18. Toprak mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.36'da verilmiştir. Toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın mikrobiyal biyokütlesi üzerindeki değişim katsayısının kontrol grubu hariç düşük değişkenlik gösterdiği, kontrol grubunun ise orta derece değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Yine aynı durum nötr topraklarda da görülmektedir. Bazik topraklardaki değişim katsayıları incelendiğinde ise kontrol grubunun yüksek değişkenlik gösterdiği, HKF ve HKF+Biochar gruplarının orta derece değişkenlik gösterdiği diğer grupların ise düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+Biochar ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP ve TSP+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise yalnızca Kontrol grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Vermikompost grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise yalnızca TSP+Biochar grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında ise asidik toprağın inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre mikrobiyal biyokütlenin normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprağın uygulamalarının sonuçları incelendiğinde de mikrobiyal biyokütlenin normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.36).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki mikrobiyal biyokütlenin anlamlı değişimine neden olmuştur (Çizelge 4.37). Asidik topraklarda en yüksek MBC değeri (0.89 mg C/g toprak), HKF+Vermikompost uygulamasında ölçülmüş olup, bunu 0.83–0.81 mg C/g ile HKF+AG ve TSP+AG takip etmiştir ( $p<0.05$ ). Bu bulgu, özellikle organik katkıların mikrobiyal biyokütleyi artırıcı etkisini açık şekilde ortaya koymaktadır. Vermikompost, mikrobiyal substrat olarak zengin karbon ve azot bileşikleri içerdiğinden, toprak canlılarını doğrudan besleyerek MBC'yi artırmaktadır (Domínguez ve Edwards, 2011). Kontrol grubundaki düşük MBC değeri (0.21 mg C/g), toprakta mikrobiyal yaşamı

Çizelge 4.36. İnkübasyon topraklarının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Mikrobiyal biyokütle C (mg C/g toprak) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|----------------------------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.                                   | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 0.17                                   | 0.26 | 0.21 | 0.04      | 0.00    | 17.62             | -0.03              | -1.25 |
|        | TSP              | 0.40                                   | 0.49 | 0.45 | 0.04      | 0.00    | 9.56              | -0.38              | -3.85 |
|        | TSP+Biochar      | 0.51                                   | 0.66 | 0.61 | 0.06      | 0.00    | 10.49             | -1.73              | 3.29  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.63                                   | 0.77 | 0.69 | 0.07      | 0.01    | 10.72             | 0.12               | -5.31 |
|        | TSP+AG           | 0.74                                   | 0.86 | 0.81 | 0.05      | 0.00    | 6.05              | -0.76              | 0.31  |
|        | HKF              | 0.43                                   | 0.49 | 0.47 | 0.03      | 0.00    | 5.74              | -0.82              | -1.44 |
|        | HKF+Biochar      | 0.60                                   | 0.69 | 0.65 | 0.04      | 0.00    | 5.54              | -1.11              | 2.20  |
|        | HKF+Vermikompost | 0.83                                   | 0.97 | 0.89 | 0.06      | 0.00    | 6.85              | 1.19               | 1.47  |
|        | HKF+AG           | 0.77                                   | 0.91 | 0.83 | 0.06      | 0.00    | 7.47              | 1.17               | 1.44  |
| Nötr   | Kontrol          | 0.17                                   | 0.26 | 0.21 | 0.04      | 0.00    | 17.14             | 1.11               | 2.20  |
|        | TSP              | 0.43                                   | 0.54 | 0.49 | 0.05      | 0.00    | 9.59              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 0.34                                   | 0.40 | 0.37 | 0.02      | 0.00    | 6.22              | 0.06               | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.43                                   | 0.51 | 0.47 | 0.04      | 0.00    | 8.94              | 0.36               | -3.95 |
|        | TSP+AG           | 0.74                                   | 0.89 | 0.82 | 0.06      | 0.00    | 7.20              | -0.72              | 1.79  |
|        | HKF              | 0.46                                   | 0.51 | 0.48 | 0.03      | 0.00    | 5.63              | 0.83               | -1.44 |
|        | HKF+Biochar      | 0.40                                   | 0.46 | 0.43 | 0.02      | 0.00    | 5.35              | -0.06              | 1.50  |
|        | HKF+Vermikompost | 0.86                                   | 0.97 | 0.92 | 0.05      | 0.00    | 5.33              | -0.76              | 0.31  |
|        | HKF+AG           | 0.80                                   | 0.89 | 0.84 | 0.04      | 0.00    | 4.40              | 0.00               | 1.10  |
| Bazik  | Kontrol          | 0.03                                   | 0.09 | 0.05 | 0.03      | 0.00    | 54.00             | 0.88               | -1.14 |
|        | TSP              | 0.29                                   | 0.34 | 0.31 | 0.03      | 0.00    | 8.71              | 0.88               | -1.14 |
|        | TSP+Biochar      | 0.40                                   | 0.49 | 0.45 | 0.04      | 0.00    | 8.00              | -1.11              | 2.20  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.51                                   | 0.66 | 0.60 | 0.06      | 0.00    | 10.33             | -1.20              | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 0.66                                   | 0.71 | 0.69 | 0.02      | 0.00    | 3.33              | -0.06              | 1.50  |
|        | HKF              | 0.11                                   | 0.17 | 0.15 | 0.03      | 0.00    | 18.00             | -0.88              | -1.14 |
|        | HKF+Biochar      | 0.20                                   | 0.29 | 0.24 | 0.04      | 0.00    | 15.42             | 0.00               | -1.10 |
|        | HKF+Vermikompost | 0.54                                   | 0.60 | 0.57 | 0.02      | 0.00    | 4.04              | 0.06               | 1.50  |
|        | HKF+AG           | 0.54                                   | 0.69 | 0.63 | 0.06      | 0.00    | 9.84              | -1.20              | 1.53  |

destekleyecek karbon kaynağının ve mikrobiyal aktiviteyi tetikleyen biyolojik faktörlerin sınırlı olduğunu göstermektedir. Nötr pH aralığı, mikroorganizmaların aktivitesinin optimum olduğu bir reaksiyon aralığıdır. Bu nedenle nötr toprakta gözlemlenen en yüksek MBC değeri olan 0.92 mg C/g (HKF+Vermikompost), mikrobiyal aktivitenin hem besin hem de pH açısından desteklendiğini göstermektedir. Aynı zamanda HKF+AG (0.84 mg C/g) ve TSP+AG (0.82 mg C/g) uygulamaları da benzer şekilde yüksek biyokütle değerlerine ulaşmıştır. Ahır gübresinin mikrobiyal yaşam için gerekli makro ve mikroblesinleri sağlaması ve substrat olarak etkili olmasıyla ilişkilidir (Tejada ve Benítez, 2006). Ayrıca fosfat kayası gibi düşük çözünürlüklü fosfor kaynaklarının mikroorganizmalar tarafından yavaş çözülmesi, uzun süreli biyolojik aktiviteyi destekleyebilir (Richardson ve Simpson, 2011). Bazik topraklarda MBC değerleri genellikle daha düşük seviyelerde seyretmiş olmakla birlikte, TSP+AG (0.69 mg C/g) ve HKF+AG (0.63 mg C/g) uygulamaları en yüksek değerleri sağlamıştır ( $p<0.05$ ). Yüksek pH'nın mikrobiyal çeşitliliği sınırlayabilmesine rağmen, uygun organik katkılarla biyokütlenin artırılabilceğini göstermektedir (Rousk ve ark., 2009). Kontrol grubunda ise MBC değeri sadece 0.05 mg C/g olup, bu toprak sisteminde mikrobiyal aktivitenin son derece sınırlı olduğunu göstermektedir. Toprakta karbon kaynağı ve mikrobiyal besin eksikliği, biyokütle oluşumunu baskılamaktadır. Biochar, MBC üzerinde sınırlı ya da etkisiz sonuçlar üretmiş ve bazı durumlarda mikroorganizmalarla substrat rekabetine girebileceği düşünülmektedir (Lehmann ve ark., 2011).

Çizelge 4.37. İnkübasyon topraklarının mikrobiyal biyokütle (mg C/g toprak) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Mikrobiyal biyokütle C (mg C/g toprak) |         |        |
|------------------|----------------------------------------|---------|--------|
|                  | Asidik                                 | Nötr    | Bazik  |
| Kontrol          | 0.21 e                                 | 0.21 e  | 0.05 g |
| TSP              | 0.45 d                                 | 0.49 c  | 0.31 d |
| TSP+Biochar      | 0.61 c                                 | 0.37 d  | 0.45 c |
| TSP+Vermikompost | 0.69 b                                 | 0.47 c  | 0.60 b |
| TSP+AG           | 0.81 a                                 | 0.82 b  | 0.69 a |
| HKF              | 0.47 d                                 | 0.48 c  | 0.15 f |
| HKF+Biochar      | 0.65 bc                                | 0.43 cd | 0.24 e |
| HKF+Vermikompost | 0.89 a                                 | 0.92 a  | 0.57 b |
| HKF+AG           | 0.83 a                                 | 0.84 b  | 0.63 b |

#### 4.1.19. Toprak fosfataz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının fosfotaz enzimi analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.38’de verilmiştir. Toprak inkübasyon çalışmasında fosfotaz enzimi değerlerinin değişkenlikleri incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik topraklarda fosfotaz enzimi üzerindeki değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta HKF+AG grubunun normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, HKF+Vermikompost grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu ve diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP+Vermikompost, TSP+AG, HKF, HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, TSP+AG ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, HKF ve HKF+Vermikompost gruplarının diğer tüm uygulama gruplarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, son olarak kontrol ve HKF+Biochar gruplarının ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprakların inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre mikrobiyal biyokütlede normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.38).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki fosfataz enziminde anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.39). Asidik toprakta en yüksek fosfataz aktivitesi  $86.64 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ toprak h}^{-1}$  ile HKF+AG uygulamasında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Bu sonuç, hem apatit gibi düşük çözünürlüklü fosfor kaynaklarının organik madde ile birlikte çözünürlüğünün artabileceği, hem de ahır gübresinin mikrobiyal fosfataz üretimini teşvik ettiği belirtilmektedir (George ve ark., 2006). Kontrol ve TSP+Biochar gruplarındaki düşük fosfataz aktivitesi ( $30.54$  ve  $32.42 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), organik materyal eksikliğinin fosfataz üretimini sınırladığını, biocharın ise kısa vadede enzim üretimini baskılayabileceğini düşündürmektedir (Lehmann ve ark., 2011). Nötr pH, fosfataz enzim aktivitesi açısından optimum aralık olarak kabul edilmektedir

Çizelge 4.38. İnkübasyon topraklarının fosfotaz enzimi analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Fosfotaz enzimi ( $\mu\text{g } p\text{-nitrofenil g}^{-1} \text{ toprak h}^{-1}$ ) |       |       |           |         |                   |                    |          |
|--------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-----------|---------|-------------------|--------------------|----------|
|        |                  | Min.                                                                                | Max.  | Ort.  | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |          |
|        |                  |                                                                                     |       |       |           |         |                   | Skewness           | Kurtosis |
| Asidik | Kontrol          | 27.66                                                                               | 33.31 | 30.54 | 2.33      | 5.42    | 7.62              | -0.14              | 0.97     |
|        | TSP              | 36.31                                                                               | 40.29 | 38.70 | 1.72      | 2.95    | 4.44              | -1.23              | 1.61     |
|        | TSP+Biochar      | 31.20                                                                               | 34.32 | 32.42 | 1.36      | 1.86    | 4.20              | 1.28               | 1.63     |
|        | TSP+Vermikompost | 39.50                                                                               | 44.15 | 42.02 | 1.94      | 3.75    | 4.61              | -0.56              | 0.93     |
|        | TSP+AG           | 80.56                                                                               | 85.20 | 83.46 | 2.23      | 4.95    | 2.67              | -0.86              | -1.29    |
|        | HKF              | 75.68                                                                               | 79.01 | 77.40 | 1.36      | 1.85    | 1.76              | -0.25              | 1.54     |
|        | HKF+Biochar      | 44.93                                                                               | 47.25 | 46.47 | 1.10      | 1.20    | 2.36              | -1.41              | 1.50     |
|        | HKF+Vermikompost | 51.12                                                                               | 55.35 | 52.57 | 1.89      | 3.57    | 3.60              | 1.77               | 3.38     |
|        | HKF+AG           | 84.75                                                                               | 88.30 | 86.64 | 1.59      | 2.52    | 1.83              | -0.29              | -2.38    |
| Nötr   | Kontrol          | 13.72                                                                               | 17.04 | 15.63 | 1.42      | 2.03    | 9.10              | -0.91              | 0.73     |
|        | TSP              | 18.59                                                                               | 22.39 | 20.12 | 1.64      | 2.68    | 8.14              | 1.16               | 1.41     |
|        | TSP+Biochar      | 27.11                                                                               | 29.96 | 28.40 | 1.22      | 1.48    | 4.28              | 0.55               | -0.13    |
|        | TSP+Vermikompost | 48.02                                                                               | 53.35 | 50.13 | 2.27      | 5.14    | 4.52              | 1.35               | 2.56     |
|        | TSP+AG           | 51.73                                                                               | 59.50 | 57.17 | 3.70      | 13.70   | 6.48              | -1.78              | 3.14     |
|        | HKF              | 50.45                                                                               | 55.77 | 53.86 | 2.36      | 5.58    | 4.38              | -1.58              | 2.66     |
|        | HKF+Biochar      | 29.36                                                                               | 33.69 | 31.22 | 1.80      | 3.24    | 5.77              | 0.98               | 2.05     |
|        | HKF+Vermikompost | 38.52                                                                               | 46.97 | 44.01 | 3.76      | 14.12   | 8.54              | -1.70              | 3.12     |
|        | HKF+AG           | 47.95                                                                               | 51.83 | 49.70 | 1.60      | 2.55    | 3.21              | 0.71               | 1.79     |
| Bazik  | Kontrol          | 33.86                                                                               | 37.18 | 35.57 | 1.36      | 1.85    | 3.82              | -0.25              | 1.53     |
|        | TSP              | 42.60                                                                               | 45.70 | 44.15 | 1.41      | 2.00    | 3.20              | 0.00               | -3.30    |
|        | TSP+Biochar      | 58.09                                                                               | 62.42 | 59.56 | 1.94      | 3.76    | 3.26              | 1.78               | 3.41     |
|        | TSP+Vermikompost | 51.45                                                                               | 55.77 | 53.91 | 1.80      | 3.24    | 3.34              | -0.98              | 2.05     |
|        | TSP+AG           | 60.19                                                                               | 64.29 | 62.88 | 1.83      | 3.34    | 2.91              | -1.75              | 3.34     |
|        | HKF              | 36.34                                                                               | 38.66 | 37.30 | 1.16      | 1.35    | 3.12              | 0.37               | -3.91    |
|        | HKF+Biochar      | 36.89                                                                               | 40.24 | 38.61 | 1.37      | 1.88    | 3.55              | -0.21              | 1.52     |
|        | HKF+Vermikompost | 50.35                                                                               | 52.67 | 51.32 | 1.16      | 1.35    | 2.26              | 0.37               | -3.90    |
|        | HKF+AG           | 44.70                                                                               | 48.02 | 46.81 | 1.45      | 2.10    | 3.10              | -1.61              | 3.02     |

(Tabatabai, 1994). Bu bağlamda en yüksek enzim aktivitesi TSP+AG (57.17  $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) ve HKF (53.86  $\mu\text{g p-NP g}^{-1}$ ) uygulamalarında tespit edilmiştir ( $p<0.05$ ). Bazık toprakta fosfataz enzimi aktivitesi, genellikle yüksek pH nedeniyle düşme eğilimindedir. Ancak bu çalışmada TSP+AG (62.88  $\mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) uygulamasının en yüksek değeri sağlaması, organik katkıların bu sınırlamayı kısmen aşabileceğini göstermektedir (Tejada ve ark., 2006). Organik materyallerin humik asit içeriği, enzim stabilizasyonu sağlayarak fosfataz aktivitesini artırabilmektedir.

HKF+AG ve TSP+AG kombinasyonları, fosfataz aktivitesini üç farklı toprakta da maksimum düzeye çıkararak, hem mikrobiyal hem enzimatik fosfor mineralizasyonunu teşvik etmiştir. Biochar katkıları, özellikle TSP ile birlikte uygulandığında bazı durumlarda fosfataz aktivitesini baskılamış olabilir. Bunun nedeni biocharın yüzey özelliklerinin enzimleri adsorbe etmesi veya mikroorganizmalarla substrat rekabetine girmesi olabilir (Thies ve ark., 2015).

Çizelge 4.39. İnkübasyon topraklarının fosfataz enzimi ( $\mu\text{g p-nitrofenil g}^{-1} \text{ toprak h}^{-1}$ ) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Fosfotaz Enzimi ( $\mu\text{g p-nitrofenil g}^{-1} \text{ toprak h}^{-1}$ ) |         |          |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------|----------|
|                  | Asidik                                                                      | Nötr    | Bazık    |
| Kontrol          | 30.54 h                                                                     | 15.63 f | 35.57 h  |
| TSP              | 38.70 g                                                                     | 20.12 e | 44.15 f  |
| TSP+Biochar      | 32.42 h                                                                     | 28.40 d | 59.56 b  |
| TSP+Vermikompost | 42.02 f                                                                     | 50.13 b | 53.91 c  |
| TSP+AG           | 83.46 b                                                                     | 57.17 a | 62.88 a  |
| HKF              | 77.40 c                                                                     | 53.86 a | 37.30 gh |
| HKF+Biochar      | 46.47 e                                                                     | 31.22 d | 38.61 g  |
| HKF+Vermikompost | 52.57 d                                                                     | 44.01 c | 51.32 d  |
| HKF+AG           | 86.64 a                                                                     | 49.70 b | 46.81 e  |

#### 4.1.20. Toprak dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak inkübasyon çalışmasının DHA analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.40'da verilmiştir. Veriler incelendiğinde inkübasyon çalışmasında dehidrogenaz enziminin, asidik, nötr ve bazik topraklarda düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta tüm uygulama gruplarının dağılımı incelendiğinde TSP+AG, HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Biochar ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP, TSP+Biochar, HKF, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Vermikompost, TSP+AG ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir. Bazik toprakta ise HKF ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik nötr ve bazik toprakların inkübasyon denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre dehidrogenaz enziminin normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.40).

Yapılan uygulamaların dehidrogenaz enziminde anlamlı değişime neden olduğu gözlenmiştir (Çizelge 4.41). Asidik toprakta en yüksek dehidrogenaz enzimi aktivitesi  $277.84 \mu\text{g TPF g}^{-1}$  toprak  $24 \text{ h}^{-1}$  ile HKF + Vermikompost uygulamasında kaydedilmiştir. Bu yüksek değer, Vermikompost gübresinin mikrobiyal biyokütleyi artırma potansiyeline ve dolayısıyla mikrobiyal metabolizmanın hızlanmasına bağlanabilir (Domínguez ve Edwards, 2011). Fosfat kayasının yavaş çözünür yapısı da mikrobiyal fosfor döngüsünü tetikleyerek DHA aktivitesini desteklemiş olabilir (Richardson ve Simpson, 2011). Nötr toprakta DHA düzeyinin en yüksek olduğu uygulama, HKF+AG ( $199.61 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) olmuştur. Bunu sırasıyla HKF ( $193.81 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) ve HKF+Vermikompost ( $131.57 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) uygulamaları izlemiştir. Organik katkıların mikrobiyal solunumu ve enzimatik aktiviteyi artırma potansiyeli, organik madde içeriği ve

Çizelge 4.40. İnkübasyon topraklarının dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Dehidrogenaz Enzimi ( $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ toprak 24 h <sup>-1</sup> ) |        |        |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.                                                                       | Max.   | Ort.   | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 51.83                                                                      | 55.82  | 53.32  | 1.91      | 3.63    | 3.57              | 0.88               | -1.15 |
|        | TSP              | 87.72                                                                      | 92.50  | 90.71  | 2.29      | 5.25    | 2.53              | -0.85              | -1.29 |
|        | TSP+Biochar      | 86.93                                                                      | 90.11  | 89.11  | 1.50      | 2.26    | 1.69              | -1.66              | 2.61  |
|        | TSP+Vermikompost | 94.09                                                                      | 100.47 | 98.08  | 3.05      | 9.33    | 3.11              | -0.86              | -1.29 |
|        | TSP+AG           | 167.46                                                                     | 170.43 | 168.71 | 1.49      | 2.23    | 0.89              | 0.34               | -4.09 |
|        | HKF              | 145.56                                                                     | 151.51 | 148.03 | 2.50      | 6.24    | 1.69              | 1.15               | 2.24  |
|        | HKF+Biochar      | 199.38                                                                     | 210.30 | 204.83 | 4.91      | 24.10   | 2.40              | 0.01               | -2.83 |
|        | HKF+Vermikompost | 276.12                                                                     | 279.09 | 277.84 | 1.50      | 2.23    | 0.54              | -0.34              | -4.09 |
|        | HKF+AG           | 233.28                                                                     | 239.22 | 236.25 | 2.55      | 6.50    | 1.08              | 0.00               | -1.01 |
| Nötr   | Kontrol          | 69.79                                                                      | 79.74  | 75.77  | 4.29      | 18.43   | 5.67              | -1.21              | 1.59  |
|        | TSP              | 111.64                                                                     | 114.61 | 112.38 | 1.49      | 2.21    | 1.32              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP+Biochar      | 95.69                                                                      | 100.66 | 96.93  | 2.49      | 6.19    | 2.57              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP+Vermikompost | 151.51                                                                     | 159.48 | 156.00 | 4.10      | 16.84   | 2.63              | -0.21              | -4.82 |
|        | TSP+AG           | 129.59                                                                     | 135.56 | 132.08 | 2.98      | 8.87    | 2.25              | 0.38               | -3.87 |
|        | HKF              | 191.25                                                                     | 199.35 | 193.81 | 3.81      | 14.50   | 1.96              | 1.67               | 2.68  |
|        | HKF+Biochar      | 109.66                                                                     | 112.61 | 111.39 | 1.24      | 1.53    | 1.11              | -1.15              | 2.25  |
|        | HKF+Vermikompost | 127.59                                                                     | 135.56 | 131.57 | 3.63      | 13.16   | 2.76              | 0.00               | -3.21 |
|        | HKF+AG           | 198.38                                                                     | 201.33 | 199.61 | 1.24      | 1.53    | 0.62              | 1.12               | 2.21  |
| Bazik  | Kontrol          | 384.78                                                                     | 390.73 | 388.50 | 2.85      | 8.11    | 0.73              | -0.86              | -1.29 |
|        | TSP              | 498.45                                                                     | 502.37 | 500.66 | 1.67      | 2.77    | 0.33              | -0.079             | 0.67  |
|        | TSP+Biochar      | 372.76                                                                     | 390.73 | 385.75 | 3.59      | 12.88   | 0.93              | 1.25               | 0.98  |
|        | TSP+Vermikompost | 514.27                                                                     | 520.14 | 517.76 | 2.48      | 6.16    | 0.48              | -1.26              | 2.41  |
|        | TSP+AG           | 621.98                                                                     | 629.95 | 625.46 | 3.40      | 11.54   | 0.54              | 0.78               | 0.49  |
|        | HKF              | 693.75                                                                     | 703.32 | 698.84 | 4.79      | 22.97   | 0.69              | -0.13              | -4.99 |
|        | HKF+Biochar      | 437.60                                                                     | 444.55 | 440.81 | 3.27      | 10.71   | 0.74              | 0.25               | -3.76 |
|        | HKF+Vermikompost | 542.24                                                                     | 548.32 | 542.75 | 2.54      | 6.46    | 0.47              | -1.07              | 2.14  |
|        | HKF+AG           | 677.67                                                                     | 683.75 | 679.85 | 2.84      | 8.09    | 0.42              | 1.16               | 0.29  |

mikrobiyal substrat zenginliği ile ilişkilidir (Tejada ve Benítez, 2006). Vermikompost gübresinin enzimatik süreçleri tetikleyici rolü bu noktada açıkça gözlenmiştir. Bazık toprakta en yüksek DHA değeri ( $698.84 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) HKF uygulamasında ölçülmüş olup, bunu HKF+AG ( $679.85 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) ve TSP+AG ( $625.46 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) uygulamaları izlemiştir. Yüksek pH koşullarında bile mikrobiyal aktivitenin bu denli yüksek olması, organik materyallerin mikrobiyal toleransı artırıcı etkisini ve toprak ortamını mikrobiyal olarak yaşanabilir kılmasını destekler niteliktedir (Rousk ve ark., 2009). Düşük DHA düzeyleri ise TSP+Biochar ( $385.75 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) ve kontrol ( $388.50 \mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) gruplarında gözlenmiştir. Biocharın kısa vadede mikrobiyal substrat eksikliği yaratabileceğini veya redoks potansiyelini baskılayıcı etki oluşturabileceğini düşündürmektedir (Lehmann ve ark., 2011).

Çizelge 4.41. İnkübasyon topraklarının dehidrogenaz enzim ( $\mu\text{g TPF g}^{-1}$  toprak  $24 \text{ h}^{-1}$ ) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Dehidrogenaz enzimi ( $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ toprak $24 \text{ h}^{-1}$ ) |          |          |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------|----------|
|                  | Asidik                                                                      | Nötr     | Bazık    |
| Kontrol          | 53.32 h                                                                     | 75.77 g  | 388.50 h |
| TSP              | 90.71 g                                                                     | 112.38 e | 500.66 f |
| TSP+Biochar      | 89.11 g                                                                     | 96.93 f  | 385.75 h |
| TSP+Vermikompost | 98.08 f                                                                     | 156.00 c | 517.76 e |
| TSP+AG           | 168.71 d                                                                    | 132.08 d | 625.46 c |
| HKF              | 148.03 e                                                                    | 193.81 b | 698.84 a |
| HKF+Biochar      | 204.83 c                                                                    | 111.39 e | 440.81 g |
| HKF+Vermikompost | 277.84 a                                                                    | 131.57 d | 542.75 d |
| HKF+AG           | 236.25 b                                                                    | 199.61 a | 679.85 b |

## 4.2. Bitki Denemesi Analiz Sonuçları

### 4.2.1. Toprak pH sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitkili deneme topraklarının pH sonuçları değişim katsayıları, basıklık ve çarpıklık değerleri incelenmiş ve Çizelge 4.42’de verilmiştir. Asidik toprağın pH üzerindeki değişim katsayısı düşük değişkenlik göstermektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik topraklarında düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri asidik toprakta TSP+AG, HKF+Vermikompost, HKF+ AG gruplarında dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, Kontrol, TSP, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+AG gruplarında normal dağılım gösterdiği ve HKF grubunun ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir. TSP+Biochar ve HKF+AG gruplarının nötr topraklardaki dağılımı normalden sivri ve veriler homojendir. TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost grupları normal dağılım göstermekte ve Kontrol, TSP, TSP+AG, HKF ve HKF+Biochar gruplarının ise dağılımı normalden basık, yayvan ve veriler heterojendir. Bazik topraklarda özellikle TSP ve HKF+Vermikompost uygulamalarında verilerin dağılımı normalden daha sivri (pozitif basıklık) olup, bu durum söz konusu uygulamaların toprak üzerinde daha homojen ve tutarlı etkiler yarattığını göstermektedir. Bu tür sivri dağılımlar, uygulama sonrası ölçülen parametrelerin dar bir aralıkta yoğunlaştığını ve dolayısıyla bu kombinasyonların etkilerinin öngörülebilir olduğunu ifade eder. Ancak, Kontrol, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF, HKF+Biochar ve HKF+AG uygulamaları ise yaklaşık olarak normal dağılım sergilemiş, yani söz konusu uygulamaların toprak tepkisi açısından ne çok homojen ne de çok değişken sonuçlar doğurduğunu, dengeli bir etki oluşturduğunu düşündürmektedir. Ayrıca, dağılımın normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu grubun TSP+AG olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerine göre asidik, nötr ve bazik topraklarda pH’nın normal dağılım gösterdiği saptanmıştır (Çizelge 4.42).

Her bir toprak grubunda uygulamalar arasındaki farklar Duncan testiyle ortaya konulmuş olup farklı harfler istatistiki olarak farklı bir grubu göstermektedir (Çizelge 4.43). Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulamaları toprak reaksiyonunda anlamlı değişime neden olmuştur ( $p<0.05$ ). Elde edilen verilere göre inkübasyon ve bitkili saksı çalışmaları arasında pH değişimleri olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.42. Bitki denemesi topraklarının pH sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | pH   |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min. | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 5.80 | 6.00 | 5.90 | 0.81      | 0.007   | 13.72             | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP              | 5.60 | 5.80 | 5.67 | 0.10      | 0.009   | 1.67              | 0.86               | -1.29 |
|        | TSP+Biochar      | 5.60 | 5.80 | 5.67 | 0.10      | 0.009   | 1.67              | 0.86               | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 5.60 | 5.80 | 5.67 | 0.10      | 0.009   | 1.67              | 0.86               | -1.29 |
|        | TSP+AG           | 6.00 | 6.30 | 6.22 | 0.15      | 0.022   | 2.41              | -2.00              | 4.00  |
|        | HKF              | 6.20 | 6.60 | 6.42 | 0.21      | 0.042   | 3.20              | -0.20              | -4.86 |
|        | HKF+Biochar      | 5.80 | 6.30 | 6.03 | 0.22      | 0.049   | 3.66              | 0.48               | -1.70 |
|        | HKF+Vermikompost | 5.90 | 6.20 | 6.08 | 0.13      | 0.016   | 2.06              | -1.13              | 2.23  |
|        | HKF+AG           | 5.60 | 6.00 | 5.85 | 0.17      | 0.03    | 2.95              | -1.54              | 2.89  |
| Nötr   | Kontrol          | 7.00 | 7.40 | 7.23 | 0.21      | 0.043   | 2.85              | -0.20              | -4.86 |
|        | TSP              | 7.10 | 7.40 | 7.28 | 0.15      | 0.023   | 2.06              | -0.37              | -3.90 |
|        | TSP+Biochar      | 7.10 | 7.30 | 7.25 | 0.10      | 0.01    | 1.37              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+Vermikompost | 7.20 | 7.40 | 7.30 | 0.08      | 0.007   | 1.11              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 7.00 | 7.10 | 7.05 | 0.06      | 0.003   | 0.81              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF              | 7.30 | 7.40 | 7.35 | 0.06      | 0.003   | 0.77              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF+Biochar      | 7.30 | 7.50 | 7.40 | 0.12      | 0.013   | 1.55              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF+Vermikompost | 7.10 | 7.30 | 7.20 | 0.08      | 0.007   | 1.13              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF+AG           | 7.40 | 7.50 | 7.43 | 0.05      | 0.002   | 0.67              | 2.00               | 4.00  |
| Bazik  | Kontrol          | 7.50 | 7.70 | 7.60 | 0.08      | 0.007   | 1.06              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP              | 7.70 | 7.80 | 7.73 | 0.05      | 0.002   | 0.64              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP+Biochar      | 7.70 | 7.90 | 7.83 | 0.10      | 0.009   | 1.21              | -0.86              | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 7.70 | 7.90 | 7.80 | 0.08      | 0.007   | 1.03              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 7.70 | 7.80 | 7.75 | 0.06      | 0.003   | 0.73              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF              | 7.50 | 7.70 | 7.58 | 0.10      | 0.009   | 1.25              | 0.86               | -1.29 |
|        | HKF+Biochar      | 7.70 | 8.00 | 7.85 | 0.13      | 0.017   | 1.64              | 0.00               | -1.20 |
|        | HKF+Vermikompost | 7.80 | 7.90 | 7.83 | 0.05      | 0.003   | 0.63              | 2.00               | 4.00  |
|        | HKF+AG           | 8.00 | 8.20 | 8.08 | 0.10      | 0.009   | 1.17              | 0.86               | -1.29 |

Bitkili saksı çalışmalarında pH inkübasyon çalışmasında asidik topraklarda yükselme eğilimi gösterirken, bazik topraklarda düşme eğilimi göstermiştir. Deneme süresince her iki çalışmada da topraklar tarla kapasitesine gelinceye kadar saf su ile sulama yapılmıştır. Ancak bitkili denemede gerek sera sıcaklıkları gerekse bitkinin sömürmesi dolayısı ile daha fazla su verilmiştir. pH'daki değişimlerde bunun etkisinin olabileceği düşünülmektedir.

Asidik topraklarda en yüksek pH değeri 6.4 ile HKF uygulamasından elde edilmiştir ( $p<0.05$ ). En düşük pH değerleri ise TSP, TSP+Biochar ve TSP+Vermikompost gruplarında 5.7 olarak kaydedilmiştir. Bu durum, asidik ortamda suda çözünebilen fosfor kaynaklarının (TSP) pH'yı artırmakta yetersiz kaldığını göstermektedir. Biocharın alkaline özelliğine rağmen pH üzerindeki kısa vadeli etkisinin sınırlı kalması, ayrıca toprakla biyolojik etkileşimin henüz başlamamış olması ihtimalinden kaynaklanmaktadır (Lehmann ve Joseph, 2024). Nötr toprakta pH değişimleri sınırlı olmakla birlikte, istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir ( $p<0.05$ ). En yüksek pH değeri 7.4 ile HKF+AG uygulamasında elde edilmiş, bu uygulama TSP+AG (7.1) uygulamasına göre anlamlı şekilde daha yüksek bulunmuştur. Ahır gübresinin tamponlama kapasitesine ve içerdiği bazik katyonların etkisine bağlanabilir (Tejada ve Benítez, 2006). Bu pH artışı mısır açısından zararlı olmayacak düzeyde olmakla birlikte, özellikle fosfor ve çinko gibi mikro elementlerin alınabilirliğini sınırlama potansiyeline sahiptir. Bu nedenle pH'nın 7.5'in üzerine çıkmadığı durumlarda bu uygulamaların daha elverişli sonuçlar vereceği söylenebilir (Alloway, 2008). Bazik topraklarda pH değerleri 7.6 ile 8.1 arasında değişmiştir. En yüksek pH değeri HKF+AG (8.1) uygulamasında ölçülmüştür. Ancak pH'nın 8.0 üzerine çıkması durumunda mısırdaki çinko, mangan ve demir gibi mikro element eksikliklerinin oluşma riski artmaktadır (Fageria, 2001). En düşük değer ise 7.6 ile kontrol ve HKF gruplarından elde edilmiştir.

Çizelge 4.43. Bitki denemesi topraklarında pH sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | pH     |         |       |
|------------------|--------|---------|-------|
|                  | Asidik | Nötr    | Bazik |
| Kontrol          | 5.9 cd | 7.2 bc  | 7.6 c |
| TSP              | 5.7 d  | 7.3 abc | 7.7 b |
| TSP+Biochar      | 5.7 d  | 7.3 abc | 7.8 b |
| TSP+Vermikompost | 5.7 d  | 7.3 abc | 7.8 b |
| TSP+AG           | 6.2 ab | 7.1 d   | 7.8 b |
| HKF              | 6.4 a  | 7.4 abc | 7.6 c |
| HKF+Biochar      | 6.0 bc | 7.4 ab  | 7.9 b |
| HKF+Vermikompost | 6.1 bc | 7.2 cd  | 7.8 b |
| HKF+AG           | 5.9 cd | 7.4 a   | 8.1 a |

Asidik toprak, HKF ve AG kombinasyonu pH'yı mısır için ideal aralığa taşımakta başarılı olmuştur. Bu tür uygulamalar hem Ca takviyesi sağlar hem de fosfor fiksasyonunu azaltır. Nötr topraklarda, uygulamalar pH'yı optimum aralıkta tutarken, özellikle organik katkıların tamponlayıcı etkileri sayesinde besin dengesini korumada avantaj sağlamaktadır.

#### 4.2.2. Toprak EC sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının EC analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler Çizelge 4.44'te verilmiştir. Değişim katsayıları EC analiz sonuçlarına göre incelendiğinde deneme topraklarından asidik toprağın, TSP, TSP+Biochar, HKF,. HKF+Biochar uygulamalarının orta derece değişken, diğer uygulamaların ise düşük derece değişken olduğu saptanmıştır. Nötr toprakta değişim katsayıları incelendiğinde yalnızca kontrol grubunun orta derece, diğer grupların ise düşük derece değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Bazik topraklarda ise EC değerlerinin yalnızca TSP+Biochar ve TSP+AG grupların orta derece, diğer grupların ise düşük derece değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.

Bitkili saksı denemesinde asidik, nötr ve bazik toprakların basıklık ve çarpıklık değerleri Çizelge 4.44'te verilmiştir. Buna göre asidik topraklarda Kontrol, TSP+Biochar, HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, TSP+AG, HKF, HKF+AG gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP+Vermikompost, HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir. Nötr topraklarda farklı fosfor ve organik madde kombinasyonlarına bağlı olarak verilerin dağılımında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. HKF ve HKF+AG uygulamalarında dağılımın normalden daha sivri olması, bu gruplarda ölçülen değerlerin ortalama etrafında sıkı şekilde toplandığını ve uygulamaların etkisinin oldukça homojen olduğunu göstermektedir. Bu durum, özellikle humik asit içeriği yüksek olan HKF kaynaklı uygulamaların toprak üzerinde tutarlı ve kararlı tepkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır. TSP, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost uygulamaları yaklaşık olarak normal dağılım sergilemiş ve uygulama kaynaklı varyasyonun ne çok homojen ne de çok değişken olduğu, istatistiksel olarak dengeli bir etki oluşturduğu ifade edilebilir. Kontrol ve TSP+AG uygulamaları ise dağılımın normalden basık ve yayvan olduğu, yani ölçülen parametrelerin oldukça geniş bir aralıkta değiştiği gruplar olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, özellikle herhangi bir uygulama yapılmayan kontrol grubunda çevresel etkilerin daha belirleyici olduğunu; TSP+AG grubunda ise ağır gübresinin düzensiz yapısı ve toprakla etkileşiminin homojen olmayan bir şekilde gerçekleştiğini düşündürmektedir. Bazik toprakların basıklık değerleri TSP+Vermikompost grubunun

dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğunu, TSP+AG, HKF, HKF+Biochar, HKF+Vermikompost, HKF+AG gruplarının normal dağılım gösterdiğini ve Kontrol, TSP, TSP+Biochar gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğunu göstermektedir.

Çarpıklık değerleri incelendiğinde asidik, nötr ve bazik toprakların normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.44).

Bitki denemesinde yapılan uygulamaların EC üzerine olan etkisi Çizelge 4.45'te verilmiştir. Organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması toprağın EC'sinde anlamlı değişikliğe neden olmuştur ( $p<0.05$ ). Bu verilere göre EC değeri asidik toprakta 203–583  $\mu\text{S/cm}$  arasında değişmiştir. En yüksek değer 583  $\mu\text{S/cm}$  ile HKF+Vermikompost uygulamasında, en düşük değerler ise kontrol (203  $\mu\text{S/cm}$ ), TSP (233  $\mu\text{S/cm}$ ) ve TSP+Vermikompost (225  $\mu\text{S/cm}$ ) gruplarında ölçülmüştür. Ögütülmüş Fosfat Kayası'nın içerdiği kalsiyum ve magnezyum tuzlarının çözünmesi ile birlikte Vermikompost gübresinin yüksek oranda çözünür makro ve mikro besin elementi sağlaması EC artışını açıklamaktadır (Domínguez ve Edwards, 2011). Buna karşılık TSP gruplarındaki düşük EC, uygulanan fosforun çözünür olsa dahi kısa vadede iyonik yük oluşturmada yetersiz kaldığını düşündürmektedir. Bu EC düzeyleri mısır açısından güvenli aralıkta kalmaktadır (Fageriave Stone, 2006). Nötr toprakta en yüksek EC değeri 540  $\mu\text{S/cm}$  ile HKF+Vermikompost, en düşük değer ise 188  $\mu\text{S/cm}$  ile TSP uygulamasında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, fosfat kayasının organik materyal ile birlikte uygulanmasının, besin elementlerinin mineralizasyonunu artırarak çözeltildeki iyon derişimini yükselttiğini göstermektedir (Tejada ve Benítez, 2006). Nötr pH'da mikrobiyal aktivite maksimum düzeye ulaştığından, vermikompost ile birlikte uygulanan fosfat kayası mikrobiyal ayrışmayı ve besin çözünürlüğünün her ikisinde desteklemiştir (Marschner, 2012). Bazik toprakta EC değerleri, 455  $\mu\text{S/cm}$  (TSP+Biochar) ile 888  $\mu\text{S/cm}$  (HKF) arasında değişmiştir. En yüksek EC değerleri TSP+AG (805  $\mu\text{S/cm}$ ), HKF (888  $\mu\text{S/cm}$ ) ve HKF+Vermikompost (845  $\mu\text{S/cm}$ ) uygulamalarında ölçülmüştür. Bu yüksek EC değerleri, mısır kök bölgesinde tuzluluk baskısı yaratmasa ve toksik düzeyde olmasa bile yaratabilecek sınıra yaklaşmaktadır. Buna rağmen, özellikle sulama suyu kalitesinin düşük olduğu koşullarda dikkatli kullanmak gerekmektedir (Ayers ve Westcot, 1985). EC artışında ahır gübresinin yüksek çözünür tuz içeriği, fosfat kayasının bazik karakteri ve

Çizelge 4.44. Bitki denemesi topraklarının EC sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | EC (µS/cm) |      |      |           |          |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|----------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans  | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 190        | 220  | 203  | 12.58     | 158.33   | 6.21              | 1.13               | 2.23  |
|        | TSP              | 170        | 310  | 233  | 59.09     | 3491     | 25.41             | 0.68               | 0.61  |
|        | TSP+Biochar      | 210        | 310  | 240  | 46.90     | 2200     | 19.54             | 1.93               | 3.81  |
|        | TSP+Vermikompost | 200        | 250  | 225  | 23.80     | 566.67   | 10.57             | 0.00               | -4.34 |
|        | TSP+AG           | 420        | 490  | 460  | 29.43     | 866.67   | 6.39              | -0.94              | 1.50  |
|        | HKF              | 310        | 440  | 393  | 61.84     | 3825     | 15.75             | -0.98              | -0.62 |
|        | HKF+Biochar      | 250        | 370  | 325  | 52.59     | 2766.67  | 16.18             | -1.44              | 2.24  |
|        | HKF+Vermikompost | 570        | 600  | 583  | 15.00     | 225      | 2.57              | 0.37               | -3.90 |
|        | HKF+AG           | 450        | 520  | 490  | 29.43     | 866.67   | 6.00              | -0.94              | 1.50  |
| Nötr   | Kontrol          | 210        | 300  | 253  | 49.24     | 2425     | 19.50             | 0.04               | -5.80 |
|        | TSP              | 170        | 210  | 188  | 17.07     | 291.67   | 9.10              | 0.75               | 0.34  |
|        | TSP+Biochar      | 200        | 250  | 228  | 20.61     | 425      | 9.05              | -0.71              | 1.79  |
|        | TSP+Vermikompost | 210        | 250  | 230  | 16.32     | 266.67   | 7.09              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 430        | 520  | 480  | 46.90     | 2200     | 9.77              | -0.16              | -5.11 |
|        | HKF              | 350        | 380  | 363  | 12.58     | 158.33   | 3.47              | 1.13               | 2.23  |
|        | HKF+Biochar      | 220        | 300  | 273  | 27.74     | 1425     | 10.18             | -1.28              | 0.85  |
|        | HKF+Vermikompost | 470        | 610  | 540  | 59.44     | 3533.33  | 11.00             | 0.00               | -0.59 |
|        | HKF+AG           | 350        | 490  | 430  | 58.30     | 3400     | 13.55             | -0.99              | 2.05  |
| Bazik  | Kontrol          | 490        | 550  | 518  | 27.53     | 758.33   | 5.31              | 0.32               | -3.03 |
|        | TSP              | 450        | 560  | 513  | 51.88     | 2691.67  | 10.12             | -0.46              | -3.11 |
|        | TSP+Biochar      | 390        | 530  | 455  | 70.47     | 4966.67  | 15.48             | 0.14               | -5.02 |
|        | TSP+Vermikompost | 510        | 580  | 555  | 31.09     | 966.67   | 5.60              | -1.60              | 2.70  |
|        | TSP+AG           | 650        | 980  | 805  | 136.74    | 18700    | 16.98             | 0.42               | 0.96  |
|        | HKF              | 760        | 1020 | 888  | 108.12    | 11691.67 | 12.18             | 0.13               | 0.48  |
|        | HKF+Biochar      | 480        | 570  | 515  | 40.41     | 1633.33  | 7.84              | 1.09               | 0.30  |
|        | HKF+Vermikompost | 800        | 910  | 845  | 47.95     | 2300     | 5.67              | 1.02               | 0.58  |
|        | HKF+AG           | 550        | 630  | 598  | 34.03     | 1158.33  | 5.69              | -1.20              | 1.98  |

mikrobiyal aktivitenin etkisi olduğu düşünülmektedir (García-Gil ve ark., 2000).

Çizelge 4.45. Bitkili deneme topraklarının EC sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | EC ( $\mu\text{S/cm}$ ) |        |        |
|------------------|-------------------------|--------|--------|
|                  | Asidik                  | Nötr   | Bazik  |
| Kontrol          | 203 e                   | 253 d  | 518 bc |
| TSP              | 233 e                   | 188 e  | 513 bc |
| TSP+Biochar      | 240 e                   | 228 de | 455 c  |
| TSP+Vermikompost | 225 e                   | 230 de | 555 bc |
| TSP+AG           | 460 b                   | 480 b  | 805 a  |
| HKF              | 393 c                   | 363 c  | 888 a  |
| HKF+Biochar      | 325 d                   | 273 d  | 515 bc |
| HKF+Vermikompost | 583 a                   | 540 a  | 845 a  |
| HKF+AG           | 490 b                   | 430 b  | 598 b  |

Sonuç olarak, HKF+Vermikompostun, her üç toprakta da EC'yi en yüksek seviyelere çıkardığı ve bu durumun hem çözünürlük hem mikrobiyal etkilerle ilişkili olduğu söylenebilir. TSP+AG uygulaması, özellikle bazik toprakta yüksek EC neden olmuş, bu da organik gübrenin hızlı ayrışmasıyla açıklanabilir. TSP+Biochar uygulamasının tüm topraklarda düşük ve orta düzey EC değerleri biocharın iyon adsorpsiyon kapasitesi ile açıklanabilir (Lehmann ve Joseph, 2015).

#### 4.2.3. Toprak kireç sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının değişim katsayıları incelenmiş ve asidik topraklarda kontrol ve TSP+AG gruplarının düşük derece değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir (Çizelge 4.46). Bunun yanında TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF, HKF+Biochar, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının orta derece değişkenlik gösterdiği ve TSP grubunun ise yüksek derecede değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Nötr topraklar incelendiğinde TSP+Biochar, HKF, HKF+AG gruplarının düşük derece değişkenlik gösterdiği, TSP+Vermikompost, TSP+AG, HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının orta derece değişkenlik gösterdiği ve Kontrol, TSP gruplarının ise yüksek derece değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Kireç analiz sonuçlarına göre bazik toprakların değişim katsayılarına bakıldığında ise tüm uygulama gruplarında düşük derece değişkenlik olduğu görülmektedir.

Topraklarının kireç analiz sonuçlarının basıklık değerleri incelendiğinde, asidik toprağın HKF, HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, HKF grubunun normal dağılım gösterdiği ve TSP, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir. Nötr toprakta TSP+Biochar, HKF, HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğunu, Kontrol, TSP+Vermikompost, HKF+Vermikompost gruplarının normal dağılım gösterdiğini ve TSP ve HKF+AG gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğunu göstermektedir. Bazik topraklardaki uygulamaların sonuçlarına göre ise dağılımın normalden sivri ve verilerin homojen olduğu grupların TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+Biochar, normal dağılım gösteren grupların TSP+AG, HKF, HKF+Vermikompost, HKF+AG olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerine göre asidik, nötr ve bazik topraklarda kirecin normal dağılım gösterdiği saptanmıştır (Çizelge 4.46).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması toprak reaksiyonunda anlamlı değişikliğe neden olmuştur ( $p<0.05$ ). Asidik toprakta kireç miktarının en yüksek olduğu grup %0.92 ile HKF+AG uygulaması olmuştur (Çizelge 4.47).

Çizelge 4.46. Bitki denemesi topraklarının kireç sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Kireç (%) |       |      |           |         |                   |                    |          |
|--------|------------------|-----------|-------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|----------|
|        |                  | Min.      | Max.  | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |          |
|        |                  |           |       |      |           |         |                   | Skewness           | Kurtosis |
| Asidik | Kontrol          | 0.00      | 0.00  | 0.00 | 0.00      | 0.00    | -                 | -                  | -        |
|        | TSP              | 0.16      | 0.32  | 0.24 | 0.09      | 0.009   | 38.33             | 0.00               | -6.00    |
|        | TSP+Biochar      | 0.32      | 0.48  | 0.40 | 0.09      | 0.009   | 23.00             | 0.00               | -6.00    |
|        | TSP+Vermikompost | 0.32      | 0.48  | 0.40 | 0.09      | 0.009   | 23.00             | 0.00               | -6.00    |
|        | TSP+AG           | 0.32      | 0.32  | 0.32 | 0.00      | 0.00    | 0.00              | -                  | -        |
|        | HKF              | 0.32      | 0.48  | 0.36 | 0.08      | 0.006   | 22.22             | 2.00               | 4.00     |
|        | HKF+Biochar      | 0.32      | 0.48  | 0.44 | 0.08      | 0.006   | 18.18             | -2.00              | 4.00     |
|        | HKF+Vermikompost | 0.32      | 0.48  | 0.40 | 0.09      | 0.009   | 23.00             | 0.00               | -6.00    |
|        | HKF+AG           | 0.32      | 0.64  | 0.52 | 0.15      | 0.023   | 29.42             | -0.86              | -1.29    |
| Nötr   | Kontrol          | 0         | 0.32  | 0.16 | 0.13      | 0.017   | 81.25             | 0.00               | 1.50     |
|        | TSP              | 0.16      | 0.32  | 0.24 | 0.09      | 0.009   | 38.33             | 0.00               | -6.00    |
|        | TSP+Biochar      | 0.48      | 0.64  | 0.60 | 0.08      | 0.006   | 13.33             | -2.00              | 4.00     |
|        | TSP+Vermikompost | 0.48      | 0.80  | 0.68 | 0.15      | 0.023   | 22.50             | -0.86              | -1.29    |
|        | TSP+AG           | 0.64      | 0.96  | 0.80 | 0.13      | 0.017   | 16.25             | 0.00               | 1.50     |
|        | HKF              | 0.64      | 0.80  | 0.76 | 0.08      | 0.006   | 10.53             | -2.00              | 4.00     |
|        | HKF+Biochar      | 0.32      | 0.48  | 0.36 | 0.08      | 0.006   | 22.22             | 2.00               | 4.00     |
|        | HKF+Vermikompost | 0.48      | 0.80  | 0.68 | 0.15      | 0.023   | 22.50             | -0.86              | -1.29    |
|        | HKF+AG           | 0.64      | 0.80  | 0.72 | 0.09      | 0.009   | 12.78             | 0.00               | -6.00    |
| Bazik  | Kontrol          | 9.41      | 9.41  | 9.41 | 0.00      | 0.00    | 0.00              | -                  | -        |
|        | TSP              | 8.63      | 9.26  | 9.02 | 0.27      | 0.074   | 3.02              | -1.52              | 2.86     |
|        | TSP+Biochar      | 9.10      | 9.26  | 9.22 | 0.08      | 0.006   | 0.87              | -2.00              | 4.00     |
|        | TSP+Vermikompost | 9.10      | 9.41  | 9.33 | 0.16      | 0.024   | 1.66              | -2.00              | 4.00     |
|        | TSP+AG           | 8.94      | 9.41  | 9.12 | 0.20      | 0.041   | 2.21              | -0.06              | -1.29    |
|        | HKF              | 8.79      | 9.10  | 8.98 | 0.15      | 0.022   | 1.65              | -0.80              | -1.57    |
|        | HKF+Biochar      | 9.10      | 9.26  | 9.22 | 0.08      | 0.006   | 0.87              | -2.00              | 4.00     |
|        | HKF+Vermikompost | 9.41      | 10.04 | 9.78 | 0.26      | 0.066   | 2.63              | -0.06              | 1.50     |
|        | HKF+AG           | 8.94      | 9.41  | 9.25 | 0.22      | 0.049   | 2.39              | -1.46              | 1.71     |

TSP+Vermikompost ve HKF+ Vermikompost gibi uygulamalar %0.40 düzeyinde kireç sağlayarak hem Ca temini hem de pH tamponlaması açısından potansiyel göstermiştir. Nötr toprakta en yüksek kireç değeri %0.80 ile TSP+AG uygulamasında elde edilmiştir. Suda çözünebilen TSP'nin çözünürlüğünün ahır gübresinden gelen bazik katyonlarla sinerjik yani pozitif bir etki gösterdiğini düşündürmektedir. Aynı zamanda bu uygulamada EC (480  $\mu$ S/cm), pH (7.05) ve organik madde (%3.32) düzeylerinin de yüksek olması, kireç içeriğinin toprak biyokimyasal süreçlerini destekleyecek şekilde entegre çalıştığını göstermektedir (García-Gil ve ark., 2000). En düşük kireç değeri kontrol grubunda %0.16 olup, bu değer Ca yetersizliğine işaret etmektedir. Bazik toprak koşullarında kireç içeriği oldukça yüksek bulunmuştur. En yüksek değer %9.73 ile HKF+Vermikompost uygulamasında ölçülmüş, bunu %9.26 ile HKF+AG ve %9.22 ile TSP+Biochar grupları takip etmiştir. Bu düzeyler, uygulanan materyallerin katkısı kadar, bazik toprağın doğal  $\text{CaCO}_3$  içeriğinin yüksek olmasına da bağlıdır. Ancak özellikle vermikompost uygulamasının kireç içeriğini yükseltmesi, bu materyalin organik asit üretimiyle Ca mobilizasyonunu artırmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Domínguez ve Edwards, 2011). Düşük kireç içeriği gösteren gruplar ise %9.02 (TSP) ve %8.98 (HKF+Biochar) olup, bu değerler hem çözünürlüğü düşük uygulamalar hem de Ca mobilizasyonu sınırlı sistemlerle ilişkilendirilebilir.

Çizelge 4.47. Bitki denemesi topraklarının kireç sonuçları istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Kireç (%) |         |         |
|------------------|-----------|---------|---------|
|                  | Asidik    | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 0.10 c    | 0.16 d  | 9.41 b  |
| TSP              | 0.24 bc   | 0.24 cd | 9.02 c  |
| TSP+Biochar      | 0.40 b    | 0.60 b  | 9.22 bc |
| TSP+Vermikompost | 0.40 b    | 0.68 ab | 9.33 b  |
| TSP+AG           | 0.32 bc   | 0.80 a  | 9.18 bc |
| HKF              | 0.36 bc   | 0.76 ab | 8.98 c  |
| HKF+Biochar      | 0.44 b    | 0.36 c  | 9.22 bc |
| HKF+Vermikompost | 0.40 b    | 0.68 ab | 9.73 a  |
| HKF+AG           | 0.92 a    | 0.72 ab | 9.26 bc |

#### 4.2.4. Toprak organik madde analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının organik madde analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerler Çizelge 4.48’de verilmiştir. Organik maddenin değişim katsayısı incelendiğinde asidik, nötr ve bazik toprakların tüm uygulamalarda düşük derece değişken olduğu görülmektedir.

Organik madde analiz sonuçlarının basıklık ve çarpıklık değerlerine bakıldığında, asidik topraklarda HKF+Biochar grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, kontrol, TSP+Vermikompost, TSP+AG, HKF, HKF+Vermikompost gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP, TSP+Biochar, HKF+AG gruplarının ise dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu görülmektedir. Nötr toprakta kontrol grubunun normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+Biochar gruplarının normal dağılım gösteren gruplar olduğu, TSP+AG, HKF, HKF+Vermikompost, HKF+AG grupların normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu saptanmıştır. Bazik toprakların basıklık değerleri incelendiğinde HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğunu gösterirken diğer tüm gruplarda normal bir dağılım gösterdiği görülmektedir

Asidik, nötr ve bazik toprakların organik madde içeriklerinin normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.48).

Bitki denemesinde farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulamalarının organik madde üzerine olan etkisi Duncan testiyle ortaya konulmuştur (Çizelge 4.49). Asidik toprakta en yüksek OM içeriği %3.99 ile HKF+Vermikompost grubunda ölçülmüştür. Özellikle vermikompostun mikrobiyal aktiviteyi ve enzimatik dönüşümü hızlandırarak organik karbon birikimini desteklediği bilinmektedir (Domínguez ve Edwards, 2011). Nötr toprakta en yüksek OM değerleri sırasıyla TSP+AG (%3.32), HKF+Vermikompost (%3.13) ve HKF+AG (%3.12) uygulamalarında elde edilmiştir. Çözünür besin elementleri ve mikroorganizmalara besin sağlama kapasitesi ile mısır kök bölgesinde organik karbonun birikmesine olanak sağlamıştır (García-Gil ve ark., 2000). En düşük değer %2.18 ile TSP+Biochar uygulamasında gözlenmiştir. Biochar uygulamalarının OM'yi doğrudan artırmadığı, aksine kısa vadede karbon ayrışmasına katkı sağlamadan toprakta kararlı bir şekilde kalarak bir fraksiyon oluşturduğu bilinmektedir (Lehmann ve

Çizelge 4.48. Bitki denemesi topraklarının organik madde sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak        | Uygulamalar      | Organik Madde (%) |      |      |           |         |                   |                    |          |
|---------------|------------------|-------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|----------|
|               |                  | Min.              | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |          |
|               |                  |                   |      |      |           |         |                   | Skewness           | Kurtosis |
| <b>Asidik</b> | Kontrol          | 2.29              | 2.58 | 2.46 | 0.13      | 0.016   | 5.08              | -1.25              | 1.80     |
|               | TSP              | 2.60              | 2.94 | 2.76 | 0.16      | 0.027   | 5.91              | 0.04               | -4.49    |
|               | TSP+Biochar      | 2.64              | 3.06 | 2.83 | 0.19      | 0.035   | 6.61              | 0.43               | -2.09    |
|               | TSP+Vermikompost | 2.48              | 2.94 | 2.77 | 0.22      | 0.046   | 7.76              | -1.17              | 0.33     |
|               | TSP+AG           | 3.42              | 3.69 | 3.58 | 0.12      | 0.014   | 3.32              | -1.08              | 0.53     |
|               | HKF              | 2.40              | 2.54 | 2.46 | 0.06      | 0.003   | 2.32              | 0.75               | 1.68     |
|               | HKF+Biochar      | 2.87              | 3.16 | 3.05 | 0.13      | 0.017   | 4.23              | -1.63              | 2.79     |
|               | HKF+Vermikompost | 3.87              | 4.15 | 3.99 | 0.12      | 0.015   | 3.11              | 0.60               | -1.41    |
|               | HKF+AG           | 3.36              | 3.94 | 3.68 | 0.27      | 0.071   | 7.23              | -0.48              | -2.55    |
| <b>Nötr</b>   | Kontrol          | 2.03              | 2.16 | 2.11 | 0.06      | 0.004   | 2.80              | -1.55              | 2.23     |
|               | TSP              | 2.31              | 2.62 | 2.50 | 0.14      | 0.020   | 5.64              | -1.29              | 0.99     |
|               | TSP+Biochar      | 2.05              | 2.37 | 2.17 | 0.14      | 0.020   | 6.59              | 1.00               | -0.03    |
|               | TSP+Vermikompost | 2.22              | 2.35 | 2.28 | 0.05      | 0.003   | 2.37              | 0.00               | 0.06     |
|               | TSP+AG           | 3.24              | 3.38 | 3.31 | 0.06      | 0.004   | 1.87              | -0.33              | -2.24    |
|               | HKF              | 2.35              | 2.54 | 2.43 | 0.09      | 0.008   | 3.58              | 0.63               | -2.09    |
|               | HKF+Biochar      | 2.36              | 2.54 | 2.44 | 0.08      | 0.006   | 3.11              | 0.70               | 0.55     |
|               | HKF+Vermikompost | 2.83              | 3.36 | 3.13 | 0.24      | 0.058   | 7.70              | -0.60              | -2.01    |
|               | HKF+AG           | 2.93              | 3.29 | 3.12 | 0.16      | 0.026   | 5.16              | -0.25              | -2.51    |
| <b>Bazik</b>  | Kontrol          | 2.02              | 2.15 | 2.07 | 0.06      | 0.003   | 2.80              | 0.74               | -1.05    |
|               | TSP              | 2.17              | 2.32 | 2.23 | 0.07      | 0.004   | 2.91              | 0.95               | 0.50     |
|               | TSP+Biochar      | 2.28              | 2.40 | 2.34 | 0.05      | 0.002   | 2.09              | -0.60              | 1.70     |
|               | TSP+Vermikompost | 2.52              | 2.65 | 2.60 | 0.06      | 0.003   | 2.27              | -1.30              | 1.10     |
|               | TSP+AG           | 2.45              | 2.78 | 2.59 | 0.14      | 0.020   | 5.52              | 0.76               | -0.19    |
|               | HKF              | 2.14              | 2.25 | 2.19 | 0.05      | 0.002   | 2.10              | 0.00               | -0.43    |
|               | HKF+Biochar      | 2.45              | 2.74 | 2.60 | 0.14      | 0.020   | 5.42              | -0.08              | -4.76    |
|               | HKF+Vermikompost | 2.88              | 2.96 | 2.91 | 0.03      | 0.001   | 1.17              | 0.75               | 0.34     |
|               | HKF+AG           | 2.84              | 2.97 | 2.89 | 0.07      | 0.005   | 2.32              | 0.17               | -5.04    |

Joseph, 2015). Bazik toprakta en yüksek OM değerleri HKF+Vermikompost (%2.92) ve HKF+AG (%2.90) uygulamalarında gözlenmiştir.

Çizelge 4.49. Bitki denemesi topraklarının organik madde sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Organik madde (%) |         |         |
|------------------|-------------------|---------|---------|
|                  | Asidik            | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 2.46 e            | 2.12 d  | 2.08 e  |
| TSP              | 2.77 d            | 2.51 b  | 2.23 cd |
| TSP+Biochar      | 2.83 cd           | 2.18 d  | 2.35 c  |
| TSP+Vermikompost | 2.78 d            | 2.29 cd | 2.60 b  |
| TSP+AG           | 3.58 b            | 3.32 a  | 2.60 b  |
| HKF              | 2.46 e            | 2.43 bc | 2.20 de |
| HKF+Biochar      | 3.05c             | 2.44 bc | 2.60 b  |
| HKF+Vermikompost | 3.99 a            | 3.13 a  | 2.92 a  |
| HKF+AG           | 3.68 b            | 3.12 a  | 2.90 a  |

Organik katkılar (özellikle vermikompost ve ahır gübresi), tüm toprak koşullarında OM içeriğini anlamlı düzeyde artırmıştır. Fosfatlı gübrelerin organik materyallerle birlikte uygulanması, mikrobiyal aktiviteyi artırarak OM'nin toprakta daha uzun süre tutulmasına katkı sağlamıştır (George ve ark., 2006). Biochar uygulamalarının, kısa vadede OM içeriği üzerinde beklenen etkiyi göstermediği, ancak uzun vadeli karbon stabilizasyonu için potansiyel sunduğu değerlendirilmektedir (Glaser ve ark., 2002).

#### 4.2.5. Toprak inorganik N analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının azot içeriği değerlerinde değişim katsayısı yalnızca asidik toprakların TSP+Biochar grubunun orta derece değişkenlik gösterdiği diğer tüm gruplar ve topraklarda değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.50).

Çarpıklık değeri (skewness) incelendiğinde asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde de belirlenen N değerlerinin normal dağılım gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) incelendiğindeyse asidik topraklarda yalnızca TSP grubunun normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen dağılım gösterdiği görülmektedir. Kontrol, TSP+AG gruplarının ise normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr topraklarda TSP + Vermikompost ve HKF +Vermikompost uygulamalarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen dağılım gösterdiği, TSP ve HKF+Vermikompost uygulamasının normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik topraklarda ise tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Azot analizi sonuçları sınır değerlerine göre incelendiğinde bitki denemesi topraklarındaki azot miktarlarının 0.045-0.09 arasında seyrettiği ve az olarak kabul edildiği görülmektedir. Yapılan Duncan test sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.51’de verilmiştir.

Buna göre asidik toprakta en yüksek inorganik N değeri %0.086 ile HKF+Vermikompost uygulamasında elde edilmiştir. Bu uygulamada hem fosfat kayasının içeriğindeki fosforun mikrobiyal aktiviteyi uyarak azot mineralizasyonunu artırdığı hem de Vermikompost gübresinin mikrobiyal substrat sağlayarak  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  dönüşümünü hızlandırdığı anlaşılmaktadır (Domínguez ve Edwards, 2011; Richardson ve Simpson, 2011). En düşük N değeri %0.036 ile TSP+Biochar uygulamasında gözlenmiştir. Biochar, kısa vadede amonyum iyonlarını adsorplayarak bitki tarafından alınabilir azot miktarını azaltabilir (Lehmann ve ark., 2011). Ayrıca biocharın yüksek pH tamponlama etkisi, mikrobiyal azot mineralizasyonunu sınırlayabilir. Nötr toprakta en yüksek N değeri %0.081 ile yine HKF+Vermikompost uygulamasında elde edilmiştir. Bu uygulamada

Çizelge 4.50. Bitki denemesi topraklarının azot analizi sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | % N  |      |       |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------|------|-------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min. | Max. | Ort.  | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 0.04 | 0.05 | 0.044 | 0.003     | 0.00    | 6.82              | 1.13               | 2.23  |
|        | TSP              | 0.04 | 0.05 | 0.047 | 0.004     | 0.00    | 8.51              | -0.17              | -4.41 |
|        | TSP+Biochar      | 0.03 | 0.05 | 0.036 | 0.009     | 0.00    | 25.00             | 1.34               | 1.23  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.05 | 0.05 | 0.046 | 0.001     | 0.00    | 2.17              | -1.41              | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 0.06 | 0.08 | 0.076 | 0.011     | 0.00    | 14.47             | -1.72              | 3.09  |
|        | HKF              | 0.07 | 0.08 | 0.079 | 0.004     | 0.00    | 5.06              | 1.00               | 0.98  |
|        | HKF+Biochar      | 0.06 | 0.06 | 0.062 | 0.003     | 0.00    | 4.84              | -0.86              | -0.29 |
|        | HKF+Vermikompost | 0.08 | 0.09 | 0.086 | 0.003     | 0.00    | 3.49              | 0.00               | 0.91  |
|        | HKF+AG           | 0.07 | 0.08 | 0.076 | 0.002     | 0.00    | 2.63              | 0.75               | 0.34  |
| Nötr   | Kontrol          | 0.03 | 0.03 | 0.033 | 0.001     | 0.00    | 3.03              | 0.86               | -1.29 |
|        | TSP              | 0.05 | 0.05 | 0.050 | 0.002     | 0.00    | 4.00              | -1.54              | 2.89  |
|        | TSP+Biochar      | 0.04 | 0.05 | 0.047 | 0.002     | 0.00    | 4.26              | -0.71              | 1.79  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.05 | 0.06 | 0.053 | 0.003     | 0.00    | 5.66              | -0.12              | -5.29 |
|        | TSP+AG           | 0.05 | 0.07 | 0.061 | 0.006     | 0.00    | 9.84              | -0.81              | 0.07  |
|        | HKF              | 0.06 | 0.06 | 0.062 | 0.002     | 0.00    | 3.23              | -0.71              | 1.79  |
|        | HKF+Biochar      | 0.06 | 0.06 | 0.057 | 0.002     | 0.00    | 3.51              | 1.19               | 1.50  |
|        | HKF+Vermikompost | 0.08 | 0.09 | 0.081 | 0.005     | 0.00    | 6.17              | -0.10              | -5.03 |
|        | HKF+AG           | 0.06 | 0.07 | 0.070 | 0.006     | 0.00    | 8.57              | -1.70              | 2.92  |
| Bazik  | Kontrol          | 0.04 | 0.05 | 0.043 | 0.002     | 0.00    | 4.65              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP              | 0.06 | 0.07 | 0.065 | 0.003     | 0.00    | 4.62              | 0.00               | -1.20 |
|        | TSP+Biochar      | 0.05 | 0.07 | 0.059 | 0.006     | 0.00    | 10.17             | -0.48              | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.07 | 0.09 | 0.078 | 0.006     | 0.00    | 7.69              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+AG           | 0.09 | 0.10 | 0.095 | 0.004     | 0.00    | 4.21              | -1.00              | 0.98  |
|        | HKF              | 0.06 | 0.09 | 0.078 | 0.010     | 0.00    | 12.82             | -0.97              | 0.69  |
|        | HKF+Biochar      | 0.05 | 0.06 | 0.055 | 0.005     | 0.00    | 9.09              | 0.60               | 1.70  |
|        | HKF+Vermikompost | 0.07 | 0.10 | 0.083 | 0.011     | 0.00    | 13.25             | -0.34              | -0.90 |
|        | HKF+AG           | 0.07 | 0.08 | 0.077 | 0.004     | 0.00    | 5.19              | 0.65               | 0.71  |

yüksek mikrobiyal aktivite ve karbon-azot dengesinin etkili biçimde yönetilmiş olması, organik maddenin hızlı mineralizasyonuna ve inorganik azot birikimine yol açmış olabilir (Tejada ve Benítez, 2006). Bazık toprakta en yüksek N değeri %0.095 ile TSP+AG grubunda kaydedilmiştir. Bu durum, ahır gübresinin çözünür azot içeriği ile mineral gübredeki N'nin pozitif bir etkileşim gösterdiğini ve yüksek pH koşullarında dahi alınabilir N miktarının artırdığını göstermektedir.

Çizelge 4.51: Bitki denemesi topraklarının azot analizi sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | % N      |          |         |
|------------------|----------|----------|---------|
|                  | Asidik   | Nötr     | Bazık   |
| Kontrol          | 0.044 de | 0.043 g  | 0.043 d |
| TSP              | 0.047 d  | 0.050 ef | 0.065 c |
| TSP+Biochar      | 0.036 e  | 0.047 f  | 0.059 c |
| TSP+Vermikompost | 0.046 d  | 0.053 de | 0.078 b |
| TSP+AG           | 0.076 b  | 0.061 c  | 0.095 a |
| HKF              | 0.079 b  | 0.062 c  | 0.078 b |
| HKF+Biochar      | 0.062 c  | 0.057 cd | 0.055 c |
| HKF+Vermikompost | 0.086 a  | 0.081 a  | 0.083 b |
| HKF+AG           | 0.076 b  | 0.070 b  | 0.077 b |

HKF+Vermikompost uygulaması, üç toprak koşulunda da en yüksek ya da ikinci en yüksek N düzeylerini sağlayarak mısır yetiştiriciliğinde etkili bir gübreleme seçeneği olduğunu göstermiştir. TSP+AG, özellikle bazık toprakta yüksek N içeriği ile mısırın verimli gelişimini destekleyebilecek güvenilir bir uygulama seçeneği olarak öne çıkmıştır. TSP+Biochar ve kontrol grupları, N içeriği açısından sınırlı değerler sunmuş, bu durum biocharın kısa vadede azot erişimini sınırlandırabileceğini göstermektedir (Beesley ve ark., 2011).

#### 4.2.6. Toprak toplam P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının toplam fosfor analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.52’de verilmiştir. Bitki denemesi topraklarının toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın toplam P’si üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik topraklarında düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+Vermikompost grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP ve TSP+Biochar gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise yalnızca TSP+Vermikompost grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta TSP, TSP+Biochar, HKF ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Vermikompost, TSP+AG ve HKF+Biochar gruplarının normal dağılım gösterdiği ve Kontrol ve HKF+Vermikompost gruplarının ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında üç toprak grubunda toplam fosforun normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.52).

Farklı harfler aynı toprak grubunda uygulamaların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir. Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki toplam fosforda anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.53). Asidik toprakta en yüksek toplam fosfor değeri 726 mg/kg ile TSP+AG uygulamasında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Bu yüksek değer, TSP’nin hızlı çözünürlüğü ve ahır gübresinin mikrobiyal aktiviteyi artırarak P mineralizasyonunu teşvik etmesiyle açıklanabilir (George ve ark., 2006). Ayrıca bu kombinasyonun düşük pH koşullarında çözünmeyen Fe/Al-P kompleksleri oluşumunu da baskıladığı düşünülmektedir (Haynes, 1982). HKF+Vermikompost (684 mg/kg) ve HKF+AG (687 mg/kg) grupları da yüksek P değerleri sunmuş ve özellikle fosfat kayasının düşük çözünürlüklü formunun organik katkılarla birlikte kullanıldığında P alınabilirliğini artırabildiğini göstermiştir (Richardson ve Simpson, 2011). Nötr toprak koşullarında en yüksek toplam fosfor düzeyi 946 mg/kg ile HKF+AG uygulamasında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, fosfat kayasının çözünürlüğünün nötr pH’da artmasıyla organik

Çizelge 4.52. Bitki denemesi topraklarının toplam P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Toplam P (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.             | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 318              | 335  | 328  | 7.01      | 49.16   | 2.14              | -0.87              | 1.14  |
|        | TSP              | 356              | 364  | 361  | 3.81      | 14.53   | 1.06              | -0.26              | -4.36 |
|        | TSP+Biochar      | 425              | 441  | 434  | 7.54      | 56.92   | 1.74              | -0.31              | -3.64 |
|        | TSP+Vermikompost | 412              | 460  | 441  | 20.29     | 411.52  | 4.60              | -1.27              | 2.18  |
|        | TSP+AG           | 704              | 751  | 726  | 19.15     | 366.88  | 2.64              | 0.48               | 1.35  |
|        | HKF              | 547              | 562  | 554  | 6.34      | 40.25   | 1.14              | 0.20               | -0.32 |
|        | HKF+Biochar      | 558              | 568  | 562  | 4.19      | 17.58   | 0.75              | 1.01               | 1.83  |
|        | HKF+Vermikompost | 673              | 691  | 684  | 5.12      | 26.25   | 0.75              | 0.75               | 0.34  |
|        | HKF+AG           | 675              | 699  | 687  | 9.95      | 99.00   | 1.45              | -0.28              | 0.77  |
| Nötr   | Kontrol          | 568              | 578  | 573  | 4.23      | 17.89   | 0.74              | 0.78               | 1.84  |
|        | TSP              | 576              | 594  | 587  | 8.20      | 67.16   | 1.40              | -0.76              | -1.34 |
|        | TSP+Biochar      | 582              | 618  | 603  | 14.79     | 218.76  | 2.45              | -0.98              | 1.90  |
|        | TSP+Vermikompost | 619              | 637  | 625  | 8.15      | 66.36   | 1.30              | 1.58               | 2.59  |
|        | TSP+AG           | 859              | 870  | 866  | 4.99      | 24.92   | 0.58              | -1.06              | 0.00  |
|        | HKF              | 755              | 775  | 764  | 8.39      | 70.33   | 1.10              | 0.58               | 0.64  |
|        | HKF+Biochar      | 832              | 841  | 836  | 3.86      | 14.92   | 0.46              | 1.00               | 0.98  |
|        | HKF+Vermikompost | 898              | 932  | 912  | 14.36     | 206.28  | 1.57              | 1.10               | 1.98  |
|        | HKF+AG           | 940              | 955  | 946  | 6.75      | 45.58   | 0.71              | 0.77               | -1.11 |
| Bazik  | Kontrol          | 310              | 323  | 318  | 5.74      | 32.92   | 1.81              | -1.53              | 2.49  |
|        | TSP              | 333              | 352  | 342  | 8.50      | 72.22   | 2.49              | 0.27               | -3.42 |
|        | TSP+Biochar      | 348              | 352  | 350  | 1.83      | 3.33    | 0.52              | 0.00               | -3.30 |
|        | TSP+Vermikompost | 355              | 359  | 357  | 1.71      | 2.92    | 0.48              | -0.75              | 0.34  |
|        | TSP+AG           | 410              | 430  | 421  | 8.58      | 73.67   | 2.04              | -0.83              | -0.23 |
|        | HKF              | 320              | 324  | 322  | 2.02      | 4.06    | 0.63              | -0.09              | -5.49 |
|        | HKF+Biochar      | 337              | 343  | 339  | 2.60      | 6.76    | 0.77              | 0.39               | -0.50 |
|        | HKF+Vermikompost | 306              | 388  | 356  | 34.85     | 1214.25 | 9.79              | -1.38              | 2.56  |
|        | HKF+AG           | 340              | 370  | 356  | 15.01     | 225.41  | 4.22              | -0.18              | -4.82 |

katkıların birlikte etkili bir P mobilizasyonu sağladığını göstermektedir (Hinsinger, 2001). Bazık toprakta en yüksek toplam fosfor değeri 421 mg/kg ile TSP+AG uygulamasında görülmüş, bunu HKF+Vermikompost (355 mg/kg) ve TSP+Vermikompost (357 mg/kg) uygulamaları takip etmiştir. Bazık koşullarda, P'nin Ca-P komplekslerine dönüşerek bitkilerce alımının zorlaşabileceği bilinmektedir (Sample ve ark., 1980). Ancak ahır gübresi gibi organik katkıların bu kompleksleşmeyi sınırlandırarak P alınabilirliğini artırabildiği düşünülmektedir (Tejada ve Benítez, 2006). En düşük toplam fosfor değeri 318 mg/kg ile kontrol grubunda kaydedilmiş olup, bu değer P yetersizliği riskine işaret etmektedir.

Çizelge 4.53. Bitki denemesi topraklarının toplam fosfor analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Toplam P (mg/kg) |          |           |
|------------------|------------------|----------|-----------|
|                  | Asidik           | Nötr     | Bazık     |
| Kontrol          | 328.03 f         | 572.56 ı | 318.25 d  |
| TSP              | 361.19 e         | 586.58 h | 341.83 bc |
| TSP+Biochar      | 433.75 d         | 602.70 g | 350.00 b  |
| TSP+Vermikompost | 441.43 d         | 625.30 f | 357.25 b  |
| TSP+AG           | 726.18 a         | 865.75 c | 421.33 a  |
| HKF              | 554.25 c         | 763.89 e | 322.31 cd |
| HKF+Biochar      | 562.25 c         | 835.75 d | 339.37 bc |
| HKF+Vermikompost | 684.25 b         | 912.23 b | 355.52 b  |
| HKF+AG           | 472.75 b         | 946.25 a | 356.29 b  |

Sonuç olarak, TSP+AG uygulaması asidik ve bazık toprakta HKF+AG ise nötr toprakta en yüksek toplam P değerlerini sağlayarak en etkili kombinasyonlar olarak öne çıkmıştır. Vermikompost gübresi, mikrobiyal aktiviteyi artırarak fosfor mineralizasyonunu desteklemiş, fosfat kayası gibi düşük çözünürlüklü kaynaklarla birlikte pozitif bir etkileşim oluşturmuştur. Biochar katkısı, kısa vadede P mobilizasyonu üzerinde sınırlı etki göstermiştir.

#### 4.2.7. Toprak inorganik P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının inorganik fosfor analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.54’de verilmiştir. Bitki denemesi topraklarının toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik ve nötr toprağın inorganik fosforu üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bazik topraklar incelendiğinde HKF+Biochar grubunun orta derece değişkenlik gösterdiği diğer grupların ise düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta yalnızca kontrol grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta kontrol ve TSP+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, yalnızca HKF+AG grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise yalnızca TSP+Vermikompost grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP, TSP+Biochar, HKF ve HKF+Biochar gruplarının normal dağılım gösterdiği ve Kontrol, TSP+AG, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprağın bitki denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre inorganik fosforda normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.54).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki inorganik fosforda anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.55). Asidik toprak koşullarında en yüksek inorganik fosfor değeri 108.87 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Vermikompost gübresinin içerdiği organik asitlerin, mikroorganizmaların fosfataz üretimini teşvik ederek fosforu organik formlardan çözebilir hale getirdiği bilinmektedir (Richardson ve Simpson, 2011). En düşük inorganik fosfor değeri 11.56 mg/kg ile kontrol grubunda ölçülmüştür. Nötr toprakta en yüksek inorganik fosfor değeri 97.05 mg/kg ile TSP+AG uygulamasında elde edilmiştir. TSP+Biochar (7.78 mg/kg) uygulamasında düşük bir inorganik fosfor düzeyi ölçülmüş, bu durum biocharın bazı durumlarda fosforu adsorplayarak geçici olarak bitkiye alınamaz forma dönüştürebileceğini göstermektedir (Lehmann ve Joseph, 2015). Bazik toprakta

Çizelge 4.54. Bitki denemesi topraklarının inorganik P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | İnorganik P (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|---------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.                | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 10                  | 13   | 12   | 1.31      | 1.71    | 10.92             | -1.45              | 2.52  |
|        | TSP              | 21                  | 23   | 23   | 0.84      | 0.70    | 3.65              | -1.19              | 0.42  |
|        | TSP+Biochar      | 12                  | 14   | 13   | 0.83      | 0.69    | 6.38              | -0.05              | -0.61 |
|        | TSP+Vermikompost | 30                  | 33   | 32   | 1.06      | 1.12    | 3.31              | -0.75              | 1.58  |
|        | TSP+AG           | 102                 | 106  | 104  | 1.72      | 2.95    | 1.65              | -1.19              | 1.51  |
|        | HKF              | 46                  | 50   | 49   | 1.68      | 2.84    | 3.43              | -1.16              | 1.94  |
|        | HKF+Biochar      | 33                  | 36   | 35   | 1.39      | 1.93    | 3.97              | -0.65              | 1.18  |
|        | HKF+Vermikompost | 107                 | 111  | 109  | 2.02      | 4.10    | 1.85              | 0.41               | -0.20 |
|        | HKF+AG           | 31                  | 38   | 34   | 2.98      | 8.91    | 8.76              | 1.39               | 1.80  |
| Nötr   | Kontrol          | 5                   | 6    | 6    | 0.39      | 0.15    | 6.50              | -1.99              | 3.97  |
|        | TSP              | 14                  | 17   | 16   | 1.21      | 1.47    | 7.56              | -0.01              | 0.40  |
|        | TSP+Biochar      | 7                   | 8    | 8    | 0.33      | 0.11    | 4.13              | 0.66               | 0.67  |
|        | TSP+Vermikompost | 23                  | 24   | 24   | 0.70      | 0.48    | 2.92              | 0.88               | -0.61 |
|        | TSP+AG           | 89                  | 110  | 97   | 8.97      | 80.37   | 9.25              | 1.38               | 2.52  |
|        | HKF              | 49                  | 54   | 52   | 2.35      | 5.54    | 4.52              | 0.00               | -1.51 |
|        | HKF+Biochar      | 8                   | 17   | 13   | 3.80      | 14.47   | 29.23             | -0.87              | 1.64  |
|        | HKF+Vermikompost | 71                  | 84   | 78   | 5.19      | 26.93   | 6.65              | -0.79              | 1.33  |
|        | HKF+AG           | 41                  | 43   | 42   | 1.00      | 0.99    | 2.38              | -0.15              | -3.74 |
| Bazik  | Kontrol          | 20                  | 22   | 21   | 0.75      | 0.57    | 3.57              | -1.73              | 3.17  |
|        | TSP              | 34                  | 37   | 35   | 0.99      | 0.98    | 2.83              | 1.06               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 22                  | 23   | 22   | 0.40      | 0.16    | 1.82              | 0.00               | 0.43  |
|        | TSP+Vermikompost | 41                  | 44   | 42   | 1.33      | 1.77    | 3.17              | 0.54               | -2.27 |
|        | TSP+AG           | 93                  | 103  | 100  | 4.59      | 21.11   | 4.59              | -1.91              | 3.68  |
|        | HKF              | 63                  | 69   | 66   | 2.52      | 6.35    | 3.82              | -0.53              | 0.66  |
|        | HKF+Biochar      | 30                  | 33   | 31   | 1.34      | 1.80    | 4.32              | -0.53              | -0.62 |
|        | HKF+Vermikompost | 82                  | 88   | 84   | 2.52      | 6.36    | 3.00              | 1.41               | 2.32  |
|        | HKF+AG           | 56                  | 61   | 59   | 2.45      | 6.00    | 4.15              | -1.56              | 2.84  |

inorganik fosfor düzeyinin en yüksek olduğu uygulama 99.96 mg/kg ile TSP+AG olmuştur. Bu uygulama, kalsiyumla zengin ortamda oluşabilecek Ca-P fiksasyonunu sınırlayan organik katkıların çözünür fosfatın çözeltide tutulmasını sağladığını göstermektedir (Sample ve ark., 1980). Yine HKF+Vermikompost (84.10 mg/kg) uygulaması da yüksek bir fosfor değeri sunmuş ve bu durum, düşük çözünürlüklü fosfat kaynaklarının organik katkılarla birlikte kullanıldığında etkili bir fosfor kaynağına dönüşebildiğini göstermektedir.

Çizelge 4.55. Bitki denemesi topraklarının inorganik P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | İnorganik P (mg/kg) |         |         |
|------------------|---------------------|---------|---------|
|                  | Asidik              | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 11.56 g             | 6.01 g  | 21.49 h |
| TSP              | 22.52 g             | 15.62 f | 35.31 f |
| TSP+Biochar      | 12.80 f             | 7.78 g  | 22.41 h |
| TSP+Vermikompost | 31.57 e             | 23.52 e | 42.00 e |
| TSP+AG           | 104.41 b            | 97.05 a | 99.96 a |
| HKF              | 48.74 c             | 51.60 c | 65.91 c |
| HKF+Biochar      | 34.58 d             | 13.48 f | 31.38 g |
| HKF+Vermikompost | 108.87 a            | 78.33 b | 84.10 b |
| HKF+AG           | 62.90 de            | 42.44 d | 59.22 d |

HKF+Vermikompost ve TSP+AG, üç toprak reaksiyonunda da en yüksek veya ikinci en yüksek inorganik fosfor düzeylerini sağlayarak mısır için optimum fosfor sağlama stratejileri olarak öne çıkmaktadır. Organik katkılar, mikrobiyal aktivite ve fosfataz enzim üretimini teşvik ederek hem çözünür fosforu artırmakta hem de uzun vadeli fosfor döngüsünü desteklemektedir (Richardson ve ark., 2011).

#### 4.2.8. Toprak organik P analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının organik fosfor (Po) analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.56'da verilmiştir. Asidik, nötr ve bazik toprakların Po'si üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta yalnızca TSP+Vermikompost grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, TSP+Biochar, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise Kontrol, TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, yalnızca HKF+Biochar grubunun normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise TSP, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, Kontrol, TSP+AG ve HKF+Biochar gruplarının normal dağılım gösterdiği ve HKF+Vermikompost grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Asidik toprakta en yüksek Po değeri 653.69 mg/kg ile HKF+AG uygulamasında elde edilmiştir (Çizelge 4.57). En düşük Po değeri ise 316.47 mg/kg ile kontrol grubunda gözlenmiştir. TSP+Biochar ve TSP+Vermikompost gibi uygulamaların da kontrol grubuna göre anlamlı artış sağladığı gözlemlenmiştir. Nötr toprakta en yüksek Po değeri 903.81 mg/kg ile HKF+AG grubunda saptanmıştır. HKF+AG uygulaması aynı zamanda mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC), toplam P ve fosfataz enzimi açısından da yüksek değerlere sahip olmuştur. TSP uygulamasında da kontrole istatistiksel olarak benzer bir durum göstermiştir. Bazik toprakta en yüksek Po değeri 327.59 mg/kg ile TSP+Biochar uygulamasında elde edilmiştir. Fosforun uzun vadede mineralizasyonla bitkiye geçip geçmeyeceği, mikrobiyal aktiviteye bağlıdır. HKF+Vermikompost uygulaması 271.43 mg/kg ile daha düşük Po değerine sahip olsa da mikrobiyal mineralizasyon potansiyeli açısından dikkat çekicidir.

Çizelge 4.56. Bitki denemesi topraklarının organik P (Po) analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Organik P (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|-------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.              | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 309               | 323  | 316  | 5.73      | 32.81   | 1.81              | -0.73              | 0.82  |
|        | TSP              | 336               | 342  | 339  | 3.03      | 9.17    | 0.89              | -0.10              | -5.23 |
|        | TSP+Biochar      | 411               | 429  | 421  | 8.35      | 69.67   | 1.98              | -0.29              | -3.40 |
|        | TSP+Vermikompost | 383               | 428  | 410  | 19.24     | 370.18  | 4.69              | -1.30              | 2.22  |
|        | TSP+AG           | 603               | 645  | 622  | 17.64     | 311.26  | 2.84              | 0.64               | 1.29  |
|        | HKF              | 501               | 513  | 506  | 5.49      | 30.15   | 1.08              | 1.22               | 1.31  |
|        | HKF+Biochar      | 525               | 532  | 528  | 2.98      | 8.86    | 0.56              | 1.45               | 1.99  |
|        | HKF+Vermikompost | 571               | 580  | 575  | 4.23      | 17.94   | 0.74              | -0.07              | -4.80 |
|        | HKF+AG           | 643               | 665  | 654  | 10.18     | 103.56  | 1.56              | 0.14               | -2.99 |
| Nötr   | Kontrol          | 563               | 572  | 567  | 3.97      | 15.79   | 0.70              | 1.09               | 2.18  |
|        | TSP              | 560               | 577  | 571  | 7.90      | 62.35   | 1.38              | -1.20              | 0.48  |
|        | TSP+Biochar      | 574               | 610  | 595  | 15.04     | 226.07  | 2.53              | -1.02              | 2.00  |
|        | TSP+Vermikompost | 594               | 614  | 602  | 8.52      | 72.62   | 1.42              | 1.47               | 2.53  |
|        | TSP+AG           | 760               | 780  | 769  | 8.85      | 78.25   | 1.15              | 0.73               | -0.91 |
|        | HKF              | 700               | 726  | 712  | 10.71     | 114.63  | 1.50              | 0.44               | 0.19  |
|        | HKF+Biochar      | 817               | 828  | 822  | 5.60      | 31.39   | 0.68              | -0.06              | -5.22 |
|        | HKF+Vermikompost | 827               | 854  | 834  | 13.36     | 178.58  | 1.60              | 1.99               | 3.97  |
|        | HKF+AG           | 897               | 914  | 904  | 7.28      | 53.02   | 0.81              | 1.01               | 0.63  |
| Bazik  | Kontrol          | 247               | 255  | 252  | 3.58      | 12.82   | 1.42              | -1.27              | 1.31  |
|        | TSP              | 297               | 317  | 307  | 9.40      | 88.29   | 3.06              | 0.19               | -3.08 |
|        | TSP+Biochar      | 326               | 330  | 328  | 2.07      | 4.28    | 0.63              | 0.44               | -3.14 |
|        | TSP+Vermikompost | 313               | 318  | 315  | 2.71      | 7.34    | 0.86              | -0.04              | -5.28 |
|        | TSP+AG           | 307               | 333  | 321  | 11.21     | 125.64  | 3.49              | -0.55              | -0.98 |
|        | HKF              | 298               | 304  | 301  | 2.61      | 6.79    | 0.87              | 0.11               | -4.35 |
|        | HKF+Biochar      | 307               | 310  | 308  | 1.32      | 1.75    | 0.43              | 1.22               | 1.11  |
|        | HKF+Vermikompost | 223               | 300  | 271  | 33.49     | 1121.67 | 12.36             | -1.58              | 2.97  |
|        | HKF+AG           | 284               | 309  | 297  | 13.04     | 169.92  | 4.39              | -0.04              | -5.70 |

Çizelge 4.57. Bitki denemesi topraklarının organik P analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | Organik P (mg/kg) |          |            |
|------------------|-------------------|----------|------------|
|                  | Asidik            | Nötr     | Bazik      |
| Kontrol          | 316.47 h          | 566.55 f | 252.34 e   |
| TSP              | 338.66 g          | 570.96 f | 306.53 bc  |
| TSP+Biochar      | 420.95 f          | 594.92 e | 327.59 a   |
| TSP+Vermikompost | 409.86 f          | 601.78 e | 315.25 abc |
| TSP+AG           | 621.77 b          | 768.70 c | 321.37 ab  |
| HKF              | 505.51 e          | 712.29 d | 300.83 bc  |
| HKF+Biochar      | 527.67 d          | 822.27 b | 307.99 abc |
| HKF+Vermikompost | 575.38 c          | 833.90 b | 271.43 d   |
| HKF+AG           | 653.69 a          | 903.81 a | 297.07 c   |

HKF+AG uygulaması, üç toprak reaksiyonunda da yüksek Po düzeyi sağlamış; özellikle nötr toprakta maksimum birikim gözlenmiştir. Vermikompost, özellikle asidik ve nötr topraklarda organik fosfor rezervlerini artırmıştır.

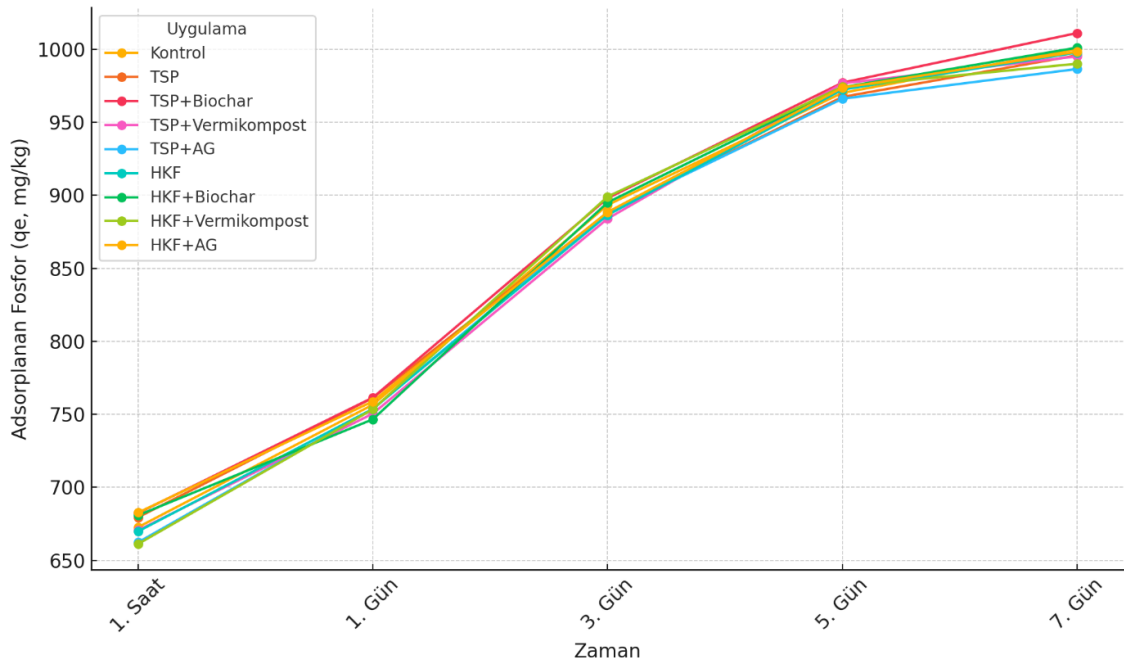
#### 4.2.9. Toprak fosfor adsorpsiyon kinetiği

Bitki denemesi asidik toprakların adsorpsiyon kinetiği zamana bağlı değişimler Çizelge 4.58’de verilmiştir. Fosfor kapsamları uygulanan fosforlu çözelti nedeniyle artış göstermiş olsa da zamana bağlı olarak artış hızı düşmektedir. Fosfor adsorpsiyon kapasitesinin en yoğun olduğu zaman aralığı 1. ile 3. gün arasında olurken 5.günden sonra tutulma artmış olsada tutulma yoğunluğu azalmıştır.

Çizelge 4.58. Bitki denemesi asidik toprak fosfor adsorpsiyon sonuçları.

| Uygulamalar      | P (mg/kg) |         |        |        |        |        |
|------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Başlangıç | 1. Saat | 1. Gün | 3. Gün | 5. Gün | 7. Gün |
| Kontrol          | 111.56    | 57.74   | 51.03  | 40.09  | 33.95  | 31.54  |
| TSP              | 122.52    | 68.16   | 61.62  | 51.46  | 45.13  | 42.85  |
| TSP+Biochar      | 112.80    | 58.21   | 51.88  | 40.96  | 34.63  | 31.91  |
| TSP+Vermikompost | 131.57    | 77.92   | 71.53  | 60.85  | 53.44  | 51.96  |
| TSP+AG           | 204.41    | 151.42  | 144.12 | 133.33 | 127.12 | 125.49 |
| HKF              | 148.74    | 95.15   | 88.44  | 77.82  | 70.95  | 68.92  |
| HKF+Biochar      | 134.58    | 80.11   | 74.85  | 62.97  | 56.66  | 54.49  |
| HKF+Vermikompost | 208.87    | 155.97  | 148.59 | 136.94 | 130.92 | 129.66 |
| HKF+AG           | 162.90    | 108.28  | 102.19 | 91.82  | 85.01  | 83.03  |

Asidik toprakta zamana bağlı fosfor değişimlerini incelemek amacıyla fosfor adsorpsiyon kinetiği qe hesaplanmış ve oluşturulan eğri Şekil 4.4.’de verilmiştir.



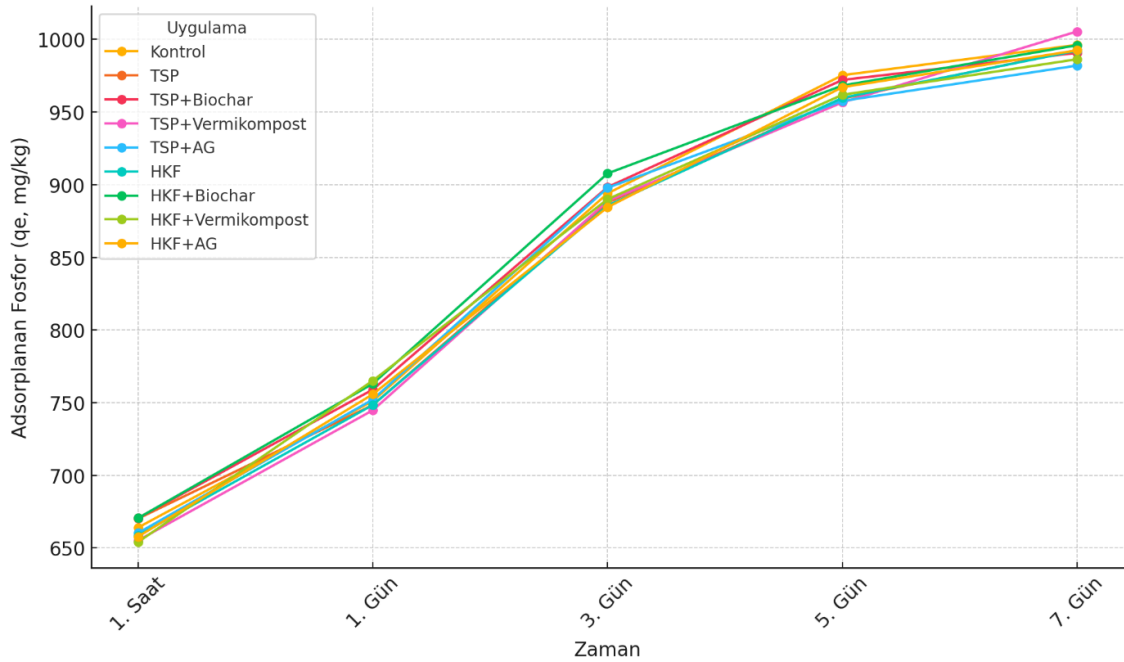
Asidik topraklar, genellikle yüksek demir (Fe) ve alüminyum (Al) içeriğine sahiptir ve bu elementlerin fosfor ile kompleks oluşturarak çözünür fosforu hızla adsorplayabildiği bilinmektedir (Parfitt, 1979; Hedley ve ark., 1982). Kontrol grubunda, fosforun başlangıçta dahi oldukça düşük miktarda kaldığı, zamanla bu düşüşün sürdüğü görülmüştür. Bu durum, mevcut Fe ve Al iyonlarının fosforu bağlamasıyla açıklanabilir. TSP uygulaması, ilk saatten itibaren fosfor adsorpsiyonunun yüksek olduğu bir profil sergilemiş, 7. gün itibarıyla dengeye yaklaşmıştır. Ancak TSP'nin çözünür formda olması nedeniyle ilk saatlerdeki adsorpsiyon hızlı olmuş, bu durum daha önce de bildirildiği üzere, çözünür ortofosfat iyonlarının toprak kolloidleri tarafından hızla tutulmasıyla açıklanabilir (Schachtman ve ark., 1998, Blake ve ark., 2003). TSP ile birlikte organik materyallerin (Biochar, Vermikompost, AG) uygulanması ise adsorpsiyon kinetiğinde belirgin değişikliklere yol açmıştır. Özellikle TSP+Vermikompost kombinasyonu, 7. gün itibarıyla en yüksek adsorpsiyon miktarına ulaşmıştır. Vermikompostun yapısındaki düşük moleküllü organik asitlerin ve mikrobiyal aktivitenin fosfatı mobilize etmesi, aynı zamanda Fe ve Al iyonları ile rekabet ederek fosforun daha uzun süre çözünür kalmasını sağlaması bu sonucu açıklamaktadır (Kashem ve ark., 2011). Biochar ise yüzey alanı ve kation değişim kapasitesi sayesinde fosforu fiziksel olarak adsorplamış ve çözeltideki fosfor miktarını düşürerek adsorpsiyonu artırmıştır (Lehmann ve Joseph, 2009). AG içeren uygulamalarda (TSP+AG ve HKF+AG) ise daha düşük adsorpsiyon değerleri elde edilmiştir. Bu durum, AG'nin şelatlayıcı yapısı ile Fe ve Al iyonlarıyla bağlanarak fosforla etkileşime girme olasılığını azaltmasıyla açıklanabilir (Gerke, 1992).

Nötr toprakta yapılan fosfor adsorpsiyon kinetiği analiz sonuçları Çizelge 4.59'da verilmiştir.

Çizelge 4.59. Bitki denemesi nötr toprakta fosfor adsorpsiyon sonuçları.

| Uygulamalar      | P (mg/kg) |         |        |        |        |        |
|------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Başlangıç | 1. Saat | 1. Gün | 3. Gün | 5. Gün | 7. Gün |
| Kontrol          | 106.01    | 52.89   | 45.92  | 34.49  | 27.98  | 26.31  |
| TSP              | 115.62    | 62.01   | 55.75  | 44.61  | 38.88  | 36.21  |
| TSP+Biochar      | 107.78    | 54.14   | 47.06  | 35.91  | 30.01  | 28.52  |
| TSP+Vermikompost | 123.52    | 71.11   | 63.94  | 52.42  | 46.99  | 43.08  |
| TSP+AG           | 197.05    | 144.23  | 136.88 | 125.22 | 120.44 | 118.49 |
| HKF              | 151.60    | 98.92   | 91.73  | 80.75  | 74.82  | 72.22  |
| HKF+Biochar      | 113.48    | 59.84   | 52.44  | 40.86  | 36.02  | 33.80  |
| HKF+Vermikompost | 178.33    | 126.01  | 117.12 | 107.13 | 101.38 | 99.42  |
| HKF+AG           | 142.44    | 89.82   | 81.98  | 71.68  | 65.07  | 63.04  |

Bitki denemesi nötr reaksiyonlu toprakların zamana bağlı fosfor değişimlerine incelemek amacıyla fosfor adsorpsiyon kinetiği qe hesaplanmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Nötr toprağın fosfor adsorpsiyonu kapasitesi (qe).

Nötr topraklarda Kontrol grubunda, adsorpsiyon sürecinin ilk saatlerde başladığı ve 7. güne kadar devam ettiği gözlemlenmiştir. Dengeye ulaşım süreci, fosforun toprak kolloidleriyle olan etkileşimlerini ve fosfat iyonlarının Al, Fe ve Ca gibi katyonlarla reaksiyona girerek çözünmez bileşikler oluşturma eğilimini göstermektedir (Hedley ve

ark., 1982; Parfitt, 1979). TSP uygulamasında, fosforun suda çözünebilen formda olması nedeniyle adsorpsiyonun hızlı başladığı, 7. gün itibariyle dengeye yaklaşıldığı görülmüştür. Bu bulgu, çözünür ortofosfatların toprak partikülleri tarafından kısa sürede tutulduğunu gösteren önceki araştırmalarla benzerlik göstermektedir (Schachtman ve ark., 1998). Bununla birlikte, adsorpsiyon miktarı kontrol grubuna kıyasla daha yüksek gerçekleşmiştir. TSP ile Biochar ve Vermikompost kombinasyonları, adsorpsiyon kinetiği açısından farklılık göstermiştir. TSP+Biochar uygulamasında, biocharın yüksek yüzey alanı ve gözenek yapısı sayesinde fosforun fiziksel olarak tutulduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, biocharın pH düzenleyici etkisi nötr toprakta fosforun çözünürlüğünü etkilemeden, adsorpsiyon mekanizmasını artırıcı yönde etkiye bulunmuştur (Lehmann & Joseph, 2009). TSP+Vermikompost uygulaması ise en yüksek adsorpsiyon miktarına ulaşan kombinasyonlardan biri olmuştur. Vermikompostun içerdiği humik maddeler ve mikrobiyal enzimler, fosforun hem mobilizasyonunu hem de mineralizasyonunu desteklemiş, dolayısıyla fosfor çözünürlüğünü artırırken aynı zamanda adsorpsiyon süreçlerini hızlandırmıştır (Kashem ve ark., 2011). Gu ve Margenot (2020) tarafından ifade edilen organik maddenin fraksiyonel fosfor dönüşümündeki rolü, bu çalışmadaki eğrilerle örtüşmektedir.

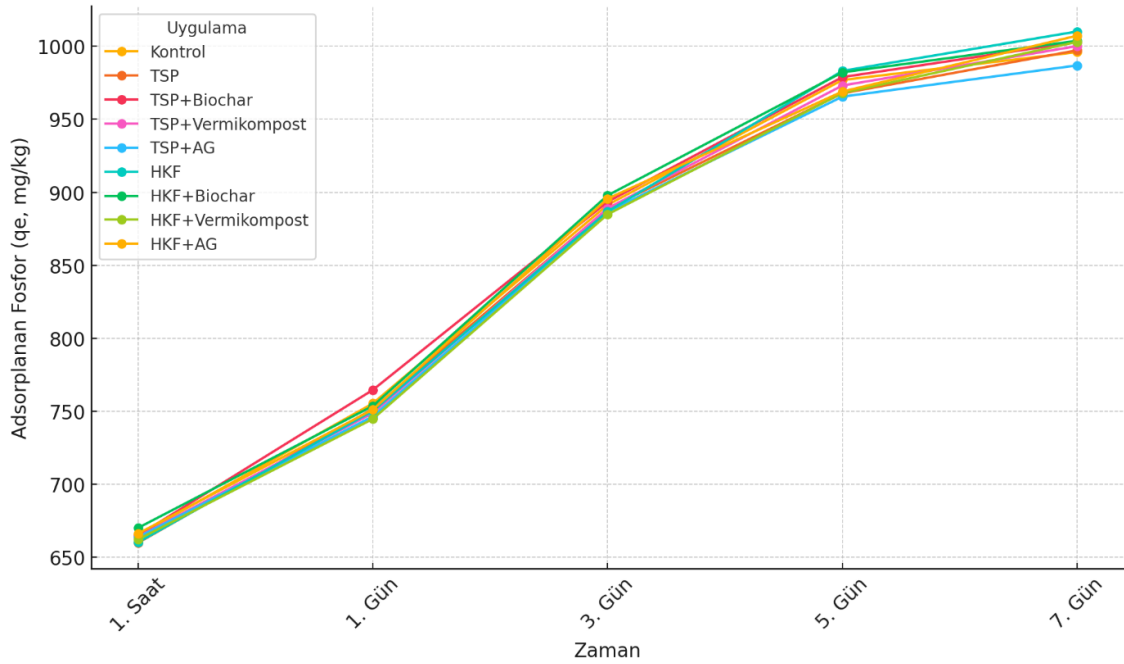
HKF+Biochar uygulamasında da, özellikle ilk günlerde yüksek adsorpsiyon oranları tespit edilmiştir. Biocharın yüzey özellikleri ve potansiyel metalleri bağlayarak fosfat iyonlarıyla etkileşimde bulunarak adsorpsiyon kinetiğini artırmıştır (Yuan ve Xu, 2011). Ancak HKF+AG uygulamasında AG'nin inhibe edici etkisi nedeniyle adsorpsiyonun nispeten daha düşük seyrettiği görülmektedir. Sonuç olarak, nötr toprak koşullarında fosfor adsorpsiyon kinetiği; uygulama materyalinin çözünürlük, kimyasal bileşim ve toprakla olan etkileşimi gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir.

Bazık topraklarda fosfor adsorpsiyon kinetiği analiz sonucunda elde edilen p içerikleri Çizelge 4.60'da verilmiştir. Asidik ve nötr topraklara benzer şekilde bazık topraklarda da fosfor tutulmasının 3.günde en yoğun olduğu, 5. ve 7.günde fosforun tutulma yoğunluğunun azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.60. Bitki denemesi bazik toprakta fosfor adsorpsiyon sonuçları.

| Uygulamalar      | P (mg/kg) |         |        |        |        |        |
|------------------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|
|                  | Başlangıç | 1. Saat | 1. Gün | 3. Gün | 5. Gün | 7. Gün |
| Kontrol          | 121.49    | 68.29   | 61.06  | 50.18  | 43.34  | 41.81  |
| TSP              | 135.31    | 82.52   | 75.18  | 64.21  | 57.89  | 55.53  |
| TSP+Biochar      | 122.41    | 69.21   | 61.24  | 50.93  | 44.10  | 42.17  |
| TSP+Vermikompost | 142.00    | 88.87   | 82.10  | 70.88  | 64.15  | 61.99  |
| TSP+AG           | 199.96    | 146.86  | 140.24 | 129.03 | 122.72 | 121.01 |
| HKF              | 165.91    | 113.09  | 105.89 | 94.96  | 87.26  | 85.10  |
| HKF+Biochar      | 131.38    | 77.77   | 71.09  | 59.55  | 52.81  | 51.08  |
| HKF+Vermikompost | 184.10    | 131.12  | 124.52 | 113.31 | 106.66 | 103.86 |
| HKF+AG           | 159.22    | 105.92  | 99.13  | 87.57  | 81.70  | 78.64  |

Bitki denemesi bazik toprakların zamana bağlı fosfor değişimleri fosfor adsorpsiyon kinetiği qe hesaplanmış ve Şekil 4.6.'de verilmiştir.



Şekil 4.6. Bazik toprağın fosfor adsorpsiyonu kinetiği (qe).

Bazik topraklar, yüksek pH nedeniyle özellikle Ca bağlı fosfor bileşiklerinin oluşumuna eğilimlidir. Bu durum, fosforun bitkiye yarıyışlılığını sınırlamakta ve adsorpsiyon süreçlerinde yavaşlamaya yol açmaktadır (Sample ve ark., 1980; Wang ve ark., 2022).

Kontrol grubunda gözlemlenen düşük adsorpsiyon oranları, bu bağlamda toprak bünyesinde mevcut fosforun sınırlı hareketliliğini ve güçlü kalsiyum fosfat komplekslerinin varlığını işaret etmektedir. TSP uygulamasıyla fosfor adsorpsiyon miktarının belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, bazik pH koşullarında çözünür TSP formunun Ca ile reaksiyona girerek Ca-P bileşikler oluşturması nedeniyle adsorpsiyon, asidik veya nötr topraklara kıyasla daha sınırlı kalmıştır (Chang ve ark., 2005). TSP'ye eklenen organik materyaller bu etkiyi modifiye etmiştir. TSP+Biochar kombinasyonunda, biocharın alkaline topraklardaki tamponlayıcı etkisi sınırlı olmakla birlikte, yüzeyindeki fonksiyonel grupların fosfat iyonlarıyla elektrostatik bağlar kurarak adsorpsiyon miktarını artırdığı düşünülmektedir (Lehmann ve Joseph, 2009). Ancak bu etkinin bazik koşullarda göreceli olarak zayıf kaldığı anlaşılmaktadır. TSP+Vermikompost uygulamasında ise, vermikompostun içerdiği humik ve fulvik asitler Ca-P komplekslerinin çözünmesini teşvik ederek daha yüksek fosfor adsorpsiyonunu mümkün kılmıştır. Ayrıca mikrobiyal aktivitenin uyarılması, fosfatın biyolojik mobilizasyonunu destekleyerek adsorpsiyona katkı sağlamıştır (Kashem ve ark., 2011). TSP+AG kombinasyonunda, başlangıç fosfor miktarı oldukça yüksek olmasına rağmen adsorpsiyon sürecinin daha sınırlı gerçekleştiği tespit edilmiştir. AG'nin içerdiği kompleksleştirici bileşenlerin Ca ile fosfat bağlarını zayıflatması ve çözeltide fosforun daha fazla kalmasına neden olması, bu gözlemi açıklamaktadır (Gerke, 1992). HKF+AG uygulamasında adsorpsiyonun sınırlı kalmış olup, AG'nin fosfor çözünürlüğünü artırırsa da toprak yüzeyine bağlanmasını engelleyici etkisinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Yuan & Xu, 2011).

Toprak pH'sı ile fosfor adsorpsiyon kinetiği arasındaki bu etkileşim, özellikle kalsiyum baskın topraklarda fosfor kaynağı seçiminde dikkatli olunması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu çalışmanın bulguları, organik katkıların bazik koşullarda dahi fosfor adsorpsiyonunu optimize etme potansiyelini göstermiştir. Ancak bu etki, katkı materyalinin kimyasal özellikleri ve mikrobiyal aktiviteyi artırma kabiliyeti ile doğrudan ilişkilidir.

#### 4.2.10. Toprakta ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının K analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.61’de verilmiştir. Bitki denemesi topraklarının toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik toprağın K içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, yalnızca TSP grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta HKF+AG grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP, TSP+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise Kontrol, TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprakta K’nın normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.61).

Bitki denemesi K analiz sonuçları Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p<0.05$ ). Yapılan Duncan testi sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.62’de verilmiştir. Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması K konsantrasyonunda anlamlı değişime neden olmuştur. Asidik toprakta en yüksek K düzeyi 268.96 mg/kg ile HKF uygulamasında ölçülmüş, bunu 268.90 mg/kg ile HKF+AG uygulaması takip etmiştir ( $p<0.05$ ). Organik materyaller, topraktaki potasyumun çözeltide tutulmasına ve alınabilir formda kalmasına katkı sağlar (Hati ve ark., 2006). En düşük değer 108.19 mg/kg ile kontrol grubunda, 115.52 mg/kg ile TSP grubunda tespit edilmiştir. Nötr toprak koşullarında en yüksek K değeri 236.13 mg/kg ile HKF+AG uygulamasında ölçülmüş olup bunu 205.44 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulaması takip etmiştir ( $p<0.05$ ). TSP+Biochar uygulamasında da nispeten düşük bir değer (132.92 mg/kg) elde edilmiş olup, bu durum biocharın potasyumu yüzeyinde bağlama kapasitesinden kaynaklanıyor olabilir (Lehmann ve Joseph, 2015).

Çizelge 4.61. Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | K (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|-----------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.      | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 100       | 113  | 108  | 5.61      | 31.50   | 5.19              | -1.37              | 1.95  |
|        | TSP              | 114       | 117  | 116  | 1.27      | 1.61    | 1.09              | 0.14               | -4.18 |
|        | TSP+Biochar      | 162       | 177  | 170  | 6.38      | 40.66   | 3.75              | -1.04              | 2.06  |
|        | TSP+Vermikompost | 182       | 213  | 201  | 13.25     | 175.54  | 6.59              | -1.36              | 2.55  |
|        | TSP+AG           | 155       | 176  | 167  | 10.28     | 105.67  | 6.16              | -0.55              | -2.65 |
|        | HKF              | 242       | 286  | 269  | 18.99     | 360.67  | 7.06              | -1.38              | 2.26  |
|        | HKF+Biochar      | 216       | 251  | 239  | 15.72     | 247.19  | 6.58              | -1.65              | 2.81  |
|        | HKF+Vermikompost | 229       | 239  | 232  | 4.78      | 22.81   | 2.06              | 1.33               | 1.12  |
|        | HKF+AG           | 244       | 283  | 263  | 15.98     | 225.25  | 6.08              | 0.43               | 1.49  |
| Nötr   | Kontrol          | 99        | 106  | 102  | 3.10      | 9.62    | 3.04              | 1.38               | 1.98  |
|        | TSP              | 125       | 131  | 128  | 3.19      | 10.16   | 2.49              | 0.15               | -4.95 |
|        | TSP+Biochar      | 128       | 139  | 133  | 4.99      | 24.92   | 3.75              | 0.11               | -3.52 |
|        | TSP+Vermikompost | 150       | 168  | 159  | 7.21      | 51.93   | 4.53              | -0.29              | 1.14  |
|        | TSP+AG           | 174       | 196  | 187  | 9.91      | 98.20   | 5.30              | -0.72              | -1.39 |
|        | HKF              | 175       | 192  | 184  | 7.07      | 50.00   | 3.84              | -0.60              | 0.87  |
|        | HKF+Biochar      | 161       | 177  | 168  | 6.49      | 42.16   | 3.86              | 0.86               | 0.99  |
|        | HKF+Vermikompost | 199       | 212  | 205  | 5.72      | 32.77   | 2.79              | 0.06               | -3.55 |
|        | HKF+AG           | 216       | 250  | 236  | 14.29     | 204.12  | 6.06              | -1.10              | 2.06  |
| Bazik  | Kontrol          | 118       | 134  | 126  | 8.09      | 65.42   | 6.42              | -0.16              | -4.93 |
|        | TSP              | 126       | 137  | 131  | 4.71      | 22.17   | 3.60              | 0.32               | -0.41 |
|        | TSP+Biochar      | 127       | 140  | 134  | 5.48      | 30.06   | 4.09              | -0.69              | 1.25  |
|        | TSP+Vermikompost | 193       | 205  | 198  | 6.35      | 40.35   | 3.21              | 0.22               | -4.71 |
|        | TSP+AG           | 213       | 227  | 221  | 6.05      | 36.57   | 2.74              | -0.72              | -1.18 |
|        | HKF              | 235       | 244  | 240  | 3.70      | 13.72   | 1.54              | -1.03              | 1.19  |
|        | HKF+Biochar      | 187       | 189  | 188  | 0.78      | 0.61    | 0.41              | 0.79               | -0.91 |
|        | HKF+Vermikompost | 215       | 230  | 222  | 6.79      | 46.09   | 3.06              | -0.14              | -2.27 |
|        | HKF+AG           | 231       | 240  | 235  | 4.13      | 17.04   | 1.76              | 0.56               | -0.16 |

Bazık toprakta ekstrakte edilebilir K düzeyinin en yüksek olduğu uygulamalar 240.23 mg/kg ile HKF ve 234.96 mg/kg ile HKF+AG'de olmuştur. Bu uygulamalar, mısırın potasyum gereksinimini karşılamada yeterli bir ortam oluşturmuştur. Düşük K değerleri kontrol (126.38 mg/kg), TSP (131.17 mg/kg) ve TSP+Biochar (133.75 mg/kg) gruplarında gözlenmiştir.

Çizelge 4.62. Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir K analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | K (mg/kg) |          |          |
|------------------|-----------|----------|----------|
|                  | Asidik    | Nötr     | Bazık    |
| Kontrol          | 108.19 e  | 101.94 f | 126.38 e |
| TSP              | 115.52 e  | 128.00 e | 131.17 e |
| TSP+Biochar      | 170.29 d  | 132.92 e | 133.75 e |
| TSP+Vermikompost | 200.90 c  | 159.10 d | 198.17 c |
| TSP+AG           | 167.17 d  | 187.15 c | 221.21 b |
| HKF              | 268.96 a  | 184.23 c | 240.23 a |
| HKF+Biochar      | 239.02 b  | 167.96 d | 187.81 d |
| HKF+Vermikompost | 232.48 b  | 205.44 b | 222.40 b |
| HKF+AG           | 268.90 a  | 236.13 a | 234.96 a |

HKF ve AG kombinasyonu, üç farklı pH koşulunda da en yüksek K düzeylerini sağlamış, potasyum yönetimi açısından oldukça etkili bir uygulama olarak öne çıkmıştır. Vermikompost uygulaması mikrobiyal aktiviteyi ve organik maddenin ayrışmasını artırarak potasyum mobilitesini desteklemiştir. Biochar uygulaması, K'yi geçici olarak yüzeyinde bağlayabilir, bu yüzden kullanımında zamanlama ve diğer materyallerle birlikte uygulanması önemlidir (Beesley ve ark., 2011).

#### 4.2.11. Toprakta ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak Ca içeriği değişkenlik katsayısı asidik, nötr ve bazik topraklarda düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.63).

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+Biochar, TSP+AG, HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP ve TSP+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Biochar ve TSP+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise TSP+Vermikompost, TSP+AG, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, Kontrol ve HKF gruplarının normal dağılım gösterdiği ve TSP, TSP+Biochar ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında, uygulamaların asidik toprakta Ca'da normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprakta Ca'un normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.63).

Farklı harfler aynı toprak grubunda uygulamaların istatistiksel olarak önemli olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.64). Asit toprak koşullarında en yüksek Ca değeri 2221.15 mg/kg ile HKF grubunda ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Fosfat kayalarının kalsiyum fosfat mineralleri içermesi ve bu minerallerin düşük pH koşullarında çözünerek  $Ca^{2+}$  salması bu artışı açıklamaktadır (Sample ve ark., 1980). Bunu 2069.40 mg/kg ile HKF+Vermikompost ve 2031.46 mg/kg ile TSP+AG uygulamaları takip etmiştir. En düşük Ca değeri ise 873.04 mg/kg ile kontrol grubunda gözlenmiştir. Nötr toprakta en yüksek Ca değeri 7538.77 mg/kg ile TSP+Biochar grubunda elde edilmiştir. Biocharın yüzeyinde tutulan katyonları çözeltiye yeniden bırakılması ve pH tampon etkisiyle Ca çözünürlüğünün artması açıklanabilir (Lehmann ve Joseph, 2015). HKF grupları TSP uygulamalarına göre daha düşük Ca değerleri göstermiştir. Bu durum, nötr pH'da fosfat kayasının çözünürlüğünün daha sınırlı olmasıyla ilişkili olabilir (Hinsinger, 2001). Bazik toprak koşullarında en yüksek Ca değeri 5168.93 mg/kg ile TSP+AG uygulamasında ölçülmüştür.

Çizelge 4.63. Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Ca (mg/kg) |      |      |           |           |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|-----------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans   | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 858        | 883  | 873  | 11.71     | 137.15    | 1.34              | -0.75              | -1.62 |
|        | TSP              | 896        | 918  | 906  | 9.10      | 82.77     | 1.00              | 0.20               | 1.26  |
|        | TSP+Biochar      | 1055       | 1223 | 1126 | 78.67     | 6189.51   | 6.99              | 0.58               | -2.49 |
|        | TSP+Vermikompost | 936        | 994  | 967  | 24.33     | 591.98    | 2.52              | -0.47              | 0.71  |
|        | TSP+AG           | 1996       | 2079 | 2031 | 40.00     | 1599.72   | 1.97              | 0.41               | -3.49 |
|        | HKF              | 1918       | 2482 | 2221 | 239.58    | 57400.85  | 10.79             | -0.45              | -0.20 |
|        | HKF+Biochar      | 1117       | 1196 | 1152 | 38.03     | 1446.48   | 3.30              | 0.26               | -4.13 |
|        | HKF+Vermikompost | 2019       | 2131 | 2069 | 54.22     | 2940.22   | 2.62              | 0.25               | -4.24 |
|        | HKF+AG           | 1939       | 2093 | 2007 | 68.02     | 4626.32   | 3.39              | 0.55               | -1.33 |
| Nötr   | Kontrol          | 6985       | 7091 | 7023 | 49.47     | 2447.53   | 0.70              | 1.19               | 0.43  |
|        | TSP              | 7228       | 7608 | 7479 | 173.98    | 30270.56  | 2.33              | -1.60              | 2.43  |
|        | TSP+Biochar      | 7519       | 7558 | 7539 | 19.42     | 377.20    | 0.26              | 0.00               | -4.99 |
|        | TSP+Vermikompost | 7047       | 7117 | 7091 | 30.66     | 939.73    | 0.43              | -1.55              | 2.65  |
|        | TSP+AG           | 7203       | 7364 | 7290 | 73.14     | 5349.73   | 1.00              | -0.38              | -2.59 |
|        | HKF              | 7078       | 7272 | 7162 | 83.54     | 6978.11   | 1.17              | 0.74               | 0.02  |
|        | HKF+Biochar      | 6794       | 7356 | 7105 | 235.16    | 55299.34  | 3.31              | -0.71              | 1.06  |
|        | HKF+Vermikompost | 6745       | 7589 | 7250 | 368.05    | 135462.20 | 5.08              | -1.12              | 1.01  |
|        | HKF+AG           | 7074       | 7279 | 7164 | 91.44     | 8360.57   | 1.28              | 0.57               | -1.56 |
| Bazik  | Kontrol          | 4740       | 4832 | 4784 | 39.26     | 1541.11   | 0.82              | 0.19               | -0.91 |
|        | TSP              | 4917       | 5034 | 4966 | 48.88     | 2389.74   | 0.98              | 1.11               | 2.14  |
|        | TSP+Biochar      | 4895       | 5005 | 4934 | 48.70     | 2372.01   | 0.99              | 1.58               | 2.66  |
|        | TSP+Vermikompost | 4840       | 4920 | 4883 | 38.45     | 1478.37   | 0.79              | -0.19              | -4.28 |
|        | TSP+AG           | 5120       | 5210 | 5169 | 40.73     | 1659.14   | 0.79              | -0.41              | -2.50 |
|        | HKF              | 5063       | 5162 | 5100 | 44.90     | 2016.16   | 0.88              | 1.21               | 0.73  |
|        | HKF+Biochar      | 4738       | 4852 | 4812 | 51.22     | 2623.07   | 1.06              | -1.71              | 3.06  |
|        | HKF+Vermikompost | 5110       | 5126 | 5119 | 7.38      | 54.45     | 0.14              | -0.28              | -2.99 |
|        | HKF+AG           | 5084       | 5102 | 5092 | 8.34      | 69.50     | 0.16              | 0.30               | -3.31 |

Bazık toprakta Ca çözünürlüğü sınırlı olmakta olup Ca çoğunlukla kalsiyum karbonat gibi çözünmeyen bileşikler halinde tutulmaktadır (McBride, 1994).

Çizelge 4.64. Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir Ca analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Ca (mg/kg) |             |            |
|------------------|------------|-------------|------------|
|                  | Asidik     | Nötr        | Bazık      |
| Kontrol          | 873.04 d   | 7023.06 c   | 4784.48 e  |
| TSP              | 906.27 d   | 7479.06 ab  | 4966.02 c  |
| TSP+Biochar      | 1125.63 c  | 7538.77 a   | 4934.37 cd |
| TSP+Vermikompost | 966.90 d   | 7091.04 c   | 4882.77 d  |
| TSP+AG           | 2031.46 b  | 7290.42 abc | 5168.93 a  |
| HKF              | 2221.15 a  | 7162.40 c   | 5099.83 b  |
| HKF+Biochar      | 1152.46 c  | 7104.85 c   | 4812.48 e  |
| HKF+Vermikompost | 2069.40 b  | 7250.21 bc  | 5118.73 ab |
| HKF+AG           | 5092.02 b  | 7163.73 c   | 5092.02 b  |

TSP+AG, tüm toprak reaksiyonlarında yüksek Ca sağlayarak Ca eksikliği riski taşıyan sistemlerde etkili bir strateji olarak öne çıkmıştır. Biochar, özellikle nötr toprakta Ca mobilizasyonunu artırmış, fakat asidik koşullarda bu etki sınırlı kalmıştır.

#### 4.2.12. Toprakta ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Asidik toprakta Mg içeriği TSP+Biochar uygulamasında orta derece değişkenlik gösterdiği diğer uygulamaların ise düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4,65). Nötr ve bazik toprakların ise tüm uygulama gruplarında düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+AG ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta TSP+AG ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Biochar grubunun normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise Kontrol, TSP ve HKF gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, yalnızca normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, HKF+AG grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprakların Mg'da normal dağılım gösterdiği görülmektedir. (Çizelge 4.65).

Asidik toprakta en yüksek Mg değeri sırasıyla TSP+AG (324.60 mg/kg) ve HKF+Vemirkompost (322.79 mg/kg) uygulamalarında tespit edilmiştir (Çizelge 4.66). Nötr toprakta en yüksek Mg düzeyleri, istatistiksel olarak aynı grupta yer alan TSP+AG (616.25 mg/kg), HKF+Vermikompost (612.79 mg/kg) ve HKF+AG (601.98 mg/kg) gruplarında elde edilmiştir. Bu bulgular, optimum pH koşullarında mikrobiyal aktivite ve organik maddenin ayrışmasının hızlanması sonucu Mg'un mineralize olarak çözeltiye geçmesiyle açıklanmaktadır (Tejada ve Benítez, 2006). En düşük değerler Kontrol (515.35 mg/kg), TSP+Vermikompost (465.42 mg/kg) ve HKF+Biochar (457.75 mg/kg) uygulamalarında belirlenmiştir. Özellikle biochar uygulamasının Mg'u kısa vadede bağlayarak ya da tamponlayıcı etki göstererek Mg'un geçici olarak çözültiden uzaklaşmasına neden olduğu düşünülmektedir (Lehmann ve Joseph, 2015). Bazik toprakta en yüksek Mg değeri 744.34 mg/kg ile TSP+AG grubunda ölçülmüştür. Hem

Çizelge 4.65. Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Mg (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 79         | 80   | 79   | 0.59      | 0.35    | 0.75              | 0.40               | 0.74  |
|        | TSP              | 81         | 85   | 83   | 1.76      | 3.11    | 2.12              | 0.25               | 0.67  |
|        | TSP+Biochar      | 76         | 112  | 93   | 15.56     | 242.06  | 16.73             | 0.33               | -1.56 |
|        | TSP+Vermikompost | 84         | 86   | 85   | 0.98      | 0.95    | 1.15              | -0.33              | -2.62 |
|        | TSP+AG           | 323        | 327  | 325  | 1.43      | 2.04    | 0.44              | 1.58               | 2.81  |
|        | HKF              | 224        | 246  | 236  | 9.59      | 92.00   | 4.06              | -0.27              | -1.55 |
|        | HKF+Biochar      | 109        | 121  | 117  | 5.27      | 27.79   | 4.50              | -1.65              | 2.82  |
|        | HKF+Vermikompost | 319        | 325  | 323  | 2.76      | 7.60    | 0.85              | -0.63              | -2.20 |
|        | HKF+AG           | 234        | 238  | 236  | 1.64      | 2.69    | 0.69              | 0.82               | -1.49 |
| Nötr   | Kontrol          | 425        | 488  | 458  | 26.48     | 701.39  | 5.78              | -0.24              | 0.07  |
|        | TSP              | 510        | 520  | 515  | 4.35      | 18.91   | 0.84              | -0.54              | 1.60  |
|        | TSP+Biochar      | 510        | 513  | 511  | 1.20      | 1.44    | 0.23              | 0.29               | -3.96 |
|        | TSP+Vermikompost | 461        | 475  | 465  | 6.68      | 44.64   | 1.44              | 1.31               | 1.02  |
|        | TSP+AG           | 608        | 630  | 616  | 9.61      | 92.43   | 1.56              | 1.42               | 2.12  |
|        | HKF              | 534        | 543  | 540  | 3.72      | 13.85   | 0.69              | -1.57              | 2.78  |
|        | HKF+Biochar      | 463        | 489  | 475  | 10.68     | 113.99  | 2.25              | 0.73               | 1.54  |
|        | HKF+Vermikompost | 575        | 652  | 613  | 31.27     | 978.09  | 5.10              | 0.10               | 1.49  |
|        | HKF+AG           | 592        | 615  | 602  | 9.38      | 88.06   | 1.56              | 0.91               | 1.92  |
| Bazik  | Kontrol          | 565        | 578  | 572  | 6.87      | 47.23   | 1.20              | -0.13              | -5.25 |
|        | TSP              | 600        | 606  | 603  | 2.80      | 7.83    | 0.46              | -0.05              | -3.14 |
|        | TSP+Biochar      | 585        | 625  | 606  | 16.49     | 272.01  | 2.72              | -0.55              | 1.55  |
|        | TSP+Vermikompost | 578        | 600  | 589  | 9.24      | 85.33   | 1.57              | -0.51              | 0.47  |
|        | TSP+AG           | 730        | 760  | 744  | 12.71     | 161.43  | 1.71              | 0.21               | 0.16  |
|        | HKF              | 675        | 690  | 682  | 6.42      | 41.22   | 0.94              | 0.16               | -0.66 |
|        | HKF+Biochar      | 609        | 614  | 611  | 2.30      | 5.28    | 0.38              | 0.58               | -2.46 |
|        | HKF+Vermikompost | 702        | 719  | 710  | 6.911     | 47.80   | 0.97              | 0.54               | 1.65  |
|        | HKF+AG           | 636        | 681  | 664  | 19.90     | 395.89  | 3.00              | -1.47              | 2.39  |

ahır gübresinin yüksek çözünür Mg içeriği hem de bazık ortamda P ile birlikte Mg'un daha alınabilir formda kalması ile açıklanabilir (Marschner, 2012). Bunu 710.13 mg/kg ile HKF+Vermikompost, 682.00 mg/kg ile HKF uygulamaları takip etmiştir. Kontrol (571.79 mg/kg) ve TSP (602.79 mg/kg) uygulamaları Mg yönünden en düşük değerlere sahip olmuş, organik materyallerin eksikliğinde Mg miktarının sınırlı kaldığını göstermektedir.

Çizelge 4.66. Bitki denemesi topraklarının ekstrakte edilebilir Mg analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Mg (mg/kg) |          |           |
|------------------|------------|----------|-----------|
|                  | Asidik     | Nötr     | Bazık     |
| Kontrol          | 82.63 e    | 515.35 d | 571.79 f  |
| TSP              | 79.42 e    | 474.52 c | 602.79 de |
| TSP+Biochar      | 93.00 d    | 511.38 c | 606.25 d  |
| TSP+Vermikompost | 84.83 de   | 465.42 d | 589.46 e  |
| TSP+AG           | 324.60 a   | 616.25 a | 744.34 a  |
| HKF              | 235.56 b   | 539.71 b | 682.00 c  |
| HKF+Biochar      | 116.92 c   | 457.75 d | 610.90 d  |
| HKF+Vermikompost | 322.79 a   | 612.79 a | 710.13 b  |
| HKF+AG           | 235.97 b   | 601.98 a | 664.13 d  |

#### 4.2.13. Toprakta alınabilir Fe analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının Fe analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.67’de verilmiştir. Asidik toprağın Fe içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Nötr topraklarda TSP grubunun yüksek değişkenlik gösterdiği, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının orta derece değişkenlik gösterirken diğer grupların düşük derece değişkenlik gösterdiği saptanmıştır. Bazık topraklarda ise TSP+Vermikompost, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının orta derece değişkenlik gösterdiği diğer grupların ise düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP, TSP+Biochar ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP+Biochar, HKF ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP ve TSP+AG gruplarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazık toprakta ise TSP+Biochar ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, Kontrol, TSP+AG ve HKF gruplarının normal dağılım gösterdiği ve diğer gruplarının ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazık topraklarda Fe’in normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.67).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki Fe konsantrasyonunda anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.68). Asidik toprak koşullarında en yüksek Fe değeri, istatistiksel olarak benzer düzeyde olan HKF+Biochar (78.79 mg/kg) ve HKF+Vermikompost (74.94 mg/kg) uygulamalarında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Bu yüksek değerler, öğütülmüş fosfat kayasının ve organik katkıların (biochar veya vermikompost) mikrobiyal aktiviteyi ve redoks potansiyelini artırarak Fe’un daha alınabilir forma dönüşmesini sağlamasıyla açıklanabilir (Domínguez ve Edwards, 2011; Lehmann ve Joseph, 2015). Kontrol grubunda en düşük değer (40.16 mg/kg), Fe’un büyük ölçüde Fe(III) oksitler formunda kaldığını ve biyolojik olarak alınabilirliğinin azaldığını

Çizelge 4.67. Bitki denemesi topraklarının alınabilir Fe analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Fe (mg/kg) |       |       |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|-------|-------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max.  | Ort.  | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 39.08      | 41.46 | 40.16 | 0.98      | 0.96    | 2.44              | 0.66               | 1.73  |
|        | TSP              | 53.48      | 53.98 | 53.83 | 0.24      | 0.06    | 0.45              | -1.88              | 3.56  |
|        | TSP+Biochar      | 63.04      | 64.10 | 63.74 | 0.48      | 0.23    | 0.75              | -1.62              | 2.60  |
|        | TSP+Vermikompost | 51.38      | 58.44 | 55.04 | 3.30      | 10.86   | 6.00              | -0.13              | -3.82 |
|        | TSP+AG           | 47.20      | 58.20 | 53.40 | 4.57      | 20.88   | 8.56              | -0.88              | 1.84  |
|        | HKF              | 53.62      | 65.50 | 58.18 | 5.11      | 26.12   | 8.78              | 1.46               | 2.71  |
|        | HKF+Biochar      | 75.96      | 81.80 | 78.79 | 2.54      | 6.46    | 3.22              | 0.17               | -1.59 |
|        | HKF+Vermikompost | 67.62      | 84.52 | 74.94 | 7.87      | 61.88   | 10.50             | 0.49               | -2.78 |
|        | HKF+AG           | 53.28      | 64.78 | 58.26 | 5.14      | 26.45   | 8.82              | 0.63               | -1.49 |
| Nötr   | Kontrol          | 1.85       | 2.26  | 2.02  | 0.17      | 0.03    | 8.42              | 1.03               | 1.59  |
|        | TSP              | 1.52       | 3.54  | 2.58  | 0.98      | 0.96    | 37.98             | -0.12              | -4.56 |
|        | TSP+Biochar      | 3.06       | 3.56  | 3.36  | 0.21      | 0.05    | 6.25              | -1.27              | 2.12  |
|        | TSP+Vermikompost | 2.12       | 2.22  | 2.18  | 0.04      | 0.00    | 1.83              | -0.48              | -1.70 |
|        | TSP+AG           | 2.98       | 3.30  | 3.13  | 0.16      | 0.03    | 5.11              | 0.20               | -4.71 |
|        | HKF              | 2.02       | 2.48  | 2.30  | 0.20      | 0.04    | 8.70              | -1.26              | 2.25  |
|        | HKF+Biochar      | 1.80       | 2.28  | 2.06  | 0.21      | 0.04    | 10.19             | -0.32              | -1.60 |
|        | HKF+Vermikompost | 2.08       | 3.70  | 3.03  | 0.69      | 0.47    | 22.77             | -1.09              | 1.60  |
|        | HKF+AG           | 2.06       | 3.36  | 2.85  | 0.56      | 0.31    | 19.65             | -1.37              | 2.46  |
| Bazik  | Kontrol          | 1.20       | 1.60  | 1.43  | 0.17      | 0.03    | 11.89             | -0.83              | -0.04 |
|        | TSP              | 2.64       | 3.70  | 3.37  | 0.50      | 0.25    | 14.84             | -1.79              | 3.19  |
|        | TSP+Biochar      | 2.20       | 2.60  | 2.38  | 0.19      | 0.04    | 7.98              | 0.29               | -3.96 |
|        | TSP+Vermikompost | 2.10       | 2.96  | 2.39  | 0.40      | 0.16    | 16.74             | 1.55               | 2.17  |
|        | TSP+AG           | 2.70       | 3.64  | 3.10  | 0.40      | 0.16    | 12.90             | 1.01               | 1.41  |
|        | HKF              | 2.14       | 3.00  | 2.67  | 0.39      | 0.15    | 14.61             | -1.10              | 0.37  |
|        | HKF+Biochar      | 2.38       | 2.66  | 2.52  | 0.13      | 0.02    | 5.16              | 0.14               | -3.25 |
|        | HKF+Vermikompost | 2.72       | 3.82  | 3.11  | 0.49      | 0.24    | 15.76             | 1.60               | 2.56  |
|        | HKF+AG           | 2.06       | 3.54  | 2.53  | 0.68      | 0.47    | 26.88             | 1.88               | 3.60  |

göstermektedir. Nötr toprakta en yüksek alınabilir Fe düzeyi 3.36 mg/kg ile TSP+Biochar uygulamasında elde edilmiştir. Bu durum biocharın iyon değişimi üzerine olan etkisi ve TSP'nin pH'yı hafif asidik seviyelere çekmesiyle Fe'un çözünürlüğünü artırması şeklinde düşünülebilir (Beesley ve ark., 2011). Ayrıca HKF+Vermikompost (3.03 mg/kg) ve TSP+AG (3.13 mg/kg) uygulamaları da yüksek değerler sunarak organik katkıların Fe alınabilirliğini desteklediğini göstermektedir. Bazık toprakta en yüksek Fe değeri 3.37 mg/kg ile TSP uygulamasında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Aynı zamanda HKF+Vermikompost (3.11 mg/kg) ve TSP+AG (3.10 mg/kg) uygulamaları da benzer yüksek seviyeler sunmuştur. Bazık koşullarda Fe genellikle  $\text{Fe(OH)}^3$  formunda bulunduğundan, organik materyallerin bu bağlanmayı engelleyerek Fe'u çözeltide tutması önemlidir (Kabata-Pendias ve Mukherjee, 2007).

Çizelge 4.68. Bitki denemesi topraklarının alınabilir Fe analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Fe (mg/kg) |          |         |
|------------------|------------|----------|---------|
|                  | Asidik     | Nötr     | Bazık   |
| Kontrol          | 40.16 d    | 2.02 d   | 1.43 d  |
| TSP              | 53.83 c    | 2.58 bcd | 3.37 a  |
| TSP+Biochar      | 63.74 b    | 3.36 a   | 2.38 c  |
| TSP+Vermikompost | 55.04 c    | 2.18 cd  | 2.39 c  |
| TSP+AG           | 53.40 c    | 3.13 ab  | 3.10 ab |
| HKF              | 58.18 bc   | 2.30 cd  | 2.67 bc |
| HKF+Biochar      | 78.79 a    | 2.06 d   | 2.52 bc |
| HKF+Vermikompost | 74.94 a    | 3.03 ab  | 3.11 ab |
| HKF+AG           | 58.26 bc   | 2.85 abc | 2.53 bc |

HKF+Vermikompost ve HKF+Biochar, asidik toprakta Fe mevcudiyetini artırmada en etkili uygulamalar olmuştur. TSP+Biochar, nötr toprakta Fe alınabilirliğini maksimize ederek mısır için kritik mikrobesein elementinin sağlanmasında öne çıkmıştır. Bazık toprak koşullarında, organik katkılarla uygulanan fosfatlı gübreler, Fe formlarını daha alınabilir hale getirme potansiyeli taşımaktadır.

#### 4.2.14. Toprakta alınabilir Zn analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının Zn analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.69’da verilmiştir. Bitki denemesi topraklarının toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın Zn içeriği üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta HKF ve HKF+Biochar uygulamalarında Zn içeriği üzerindeki değişim katsayısının orta derece değişkenlik gösterdiği, diğer uygulamalarda ise düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bazık topraklarda TSP+AG ve HKF+AG uygulamalarının orta derece değişkenlik gösterdiği diğer uygulamaların düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta yalnızca Kontrol grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta Kontrol, TSP+Vermikompost ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazık toprakta TSP+AG grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazık toprakların bitki denemesinde yapılan uygulama sonuçlarına göre Zn’nun normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.69).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki Zn konsantrasyonunda anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.70). Asidik toprakta en yüksek Zn değeri 4.13 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında ölçülmüş, bunu 3.22 mg/kg ile TSP+AG, 2.56 mg/kg ile HKF+Biochar uygulamaları takip etmiştir ( $p<0.05$ ). Vermikompost gübresi gibi mikrobiyal aktiviteyi destekleyen organik materyaller ise Zn’un organik komplekslerle şelatlanmasını kolaylaştırarak bitkiye yararlılığını artırmaktadır (Domínguez ve Edwards, 2011). TSP, TSP+Biochar ve TSP+Vermikompost uygulamaların da kontrol gibi düşük değerler ölçülmüştür. Nötr toprakta en yüksek Zn değeri 2.10 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında ölçülmüş, bunu 1.83 mg/kg ile TSP+AG uygulaması takip etmiştir. En düşük Zn değerleri 0.40 mg/kg ile kontrol grubunda, bunu takiben TSP, TSP+Biochar ve TSP+Vermikompost uygulamalarında (0.44–0.49 mg/kg) gözlenmiştir.

Çizelge 4.69. Bitki denemesi topraklarının alınabilir Zn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Zn (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 1.05       | 1.08 | 1.07 | 0.02      | 0.00    | 1.87              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP              | 1.66       | 1.74 | 1.70 | 0.03      | 0.00    | 1.76              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 1.78       | 1.82 | 1.80 | 0.02      | 0.00    | 1.11              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 1.66       | 1.86 | 1.75 | 0.08      | 0.01    | 4.57              | 1.01               | 1.83  |
|        | TSP+AG           | 2.70       | 3.68 | 3.22 | 0.41      | 0.17    | 12.73             | -0.41              | 0.67  |
|        | HKF              | 1.92       | 2.58 | 2.32 | 0.28      | 0.08    | 12.07             | -1.30              | 2.01  |
|        | HKF+Biochar      | 2.04       | 2.88 | 2.56 | 0.37      | 0.14    | 14.45             | -1.30              | 1.50  |
|        | HKF+Vermikompost | 3.86       | 4.30 | 4.13 | 0.20      | 0.04    | 4.84              | -1.06              | 0.00  |
|        | HKF+AG           | 1.90       | 2.38 | 2.16 | 0.20      | 0.04    | 9.26              | -0.45              | 1.56  |
| Nötr   | Kontrol          | 0.40       | 0.41 | 0.40 | 0.00      | 0.00    | 0.00              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP              | 0.40       | 0.48 | 0.45 | 0.03      | 0.00    | 6.67              | -0.75              | 0.34  |
|        | TSP+Biochar      | 0.40       | 0.48 | 0.44 | 0.03      | 0.00    | 6.82              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.40       | 0.54 | 0.49 | 0.06      | 0.00    | 12.24             | -1.38              | 2.60  |
|        | TSP+AG           | 1.66       | 1.96 | 1.83 | 0.12      | 0.02    | 6.56              | -0.71              | 1.79  |
|        | HKF              | 0.76       | 1.14 | 0.91 | 0.16      | 0.03    | 17.58             | 1.45               | 2.51  |
|        | HKF+Biochar      | 0.46       | 0.72 | 0.57 | 0.12      | 0.54    | 21.05             | 0.76               | -1.57 |
|        | HKF+Vermikompost | 1.96       | 2.32 | 2.10 | 0.16      | 0.02    | 7.62              | 1.26               | 1.50  |
|        | HKF+AG           | 0.98       | 1.08 | 1.04 | 0.04      | 0.00    | 3.85              | -0.71              | 1.79  |
| Bazik  | Kontrol          | 0.20       | 0.22 | 0.21 | 0.01      | 0.00    | 4.76              | 0.85               | -1.29 |
|        | TSP              | 0.22       | 0.28 | 0.25 | 0.03      | 0.00    | 12.00             | 0.00               | -1.20 |
|        | TSP+Biochar      | 0.20       | 0.24 | 0.22 | 0.02      | 0.00    | 9.09              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 0.24       | 0.28 | 0.27 | 0.02      | 0.00    | 7.41              | -0.85              | -1.29 |
|        | TSP+AG           | 1.04       | 1.64 | 1.39 | 0.28      | 0.08    | 20.14             | -0.56              | -2.48 |
|        | HKF              | 0.70       | 0.94 | 0.81 | 0.11      | 0.01    | 13.58             | 0.57               | -1.71 |
|        | HKF+Biochar      | 0.24       | 0.28 | 0.26 | 0.02      | 0.00    | 7.69              | 0.85               | -1.29 |
|        | HKF+Vermikompost | 1.02       | 1.08 | 1.05 | 0.03      | 0.00    | 2.86              | 0.00               | -1.20 |
|        | HKF+AG           | 0.64       | 0.92 | 0.79 | 0.12      | 0.01    | 15.19             | -0.23              | 0.28  |

Bu sonuçlar, mineral gübrelerle Zn ilavesinin sağlamadığı durumda Zn eksikliği riskinin yüksek olduğunu göstermektedir (Fageria ve ark., 2002).

Çizelge 4.70. Bitki denemesi topraklarının alınabilir Zn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Zn (mg/kg) |         |        |
|------------------|------------|---------|--------|
|                  | Asidik     | Nötr    | Bazik  |
| Kontrol          | 1.07 f     | 0.40 e  | 0.20 d |
| TSP              | 1.70 e     | 0.45 de | 0.25 d |
| TSP+Biochar      | 1.80 e     | 0.44 de | 0.22 d |
| TSP+Vermikompost | 1.75 e     | 0.49 de | 0.27 d |
| TSP+AG           | 3.22 b     | 1.83 b  | 1.39 a |
| HKF              | 2.32 cd    | 0.91 c  | 0.81 c |
| HKF+Biochar      | 2.56 c     | 0.57 d  | 0.26 d |
| HKF+Vermikompost | 4.13 a     | 2.10 a  | 1.05 b |
| HKF+AG           | 1.08 d     | 1.04 c  | 0.79 c |

#### 4.2.15. Toprakta alınabilir Cu analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının Cu analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.71’de verilmiştir. Asidik toprağın Cu içeriği değişim katsayısının TSP+AG uygulamasında orta derece değişkenlik gösterdiği, diğer tüm uygulamalarda ise düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta HKF+ Vermikompost uygulamasının Cu değeri orta derece değişkenlik gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise düşük derece değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bazık toprakta tüm uygulamaların düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP, TSP+Biochar ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta TSP+Vermikompost grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, Kontrol, TSP ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazık toprakta ise Kontrol, TSP+AG ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerleri (skewness) asidik toprakta Cu’da normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazık toprak uygulama sonuçları incelendiğinde de Cu’un normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.71).

Asidik toprakta en yüksek Cu değeri 2.12 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında tespit edilmiştir ( $p<0.05$ ) (Çizelge 4.72). Bu durum öğütülmüş fosfat kayasının doğal Cu içeriği ve vermikompostun mikrobiyal aktiviteyi teşvik ederek Cu’un mobilizasyonunu desteklemesiyle açıklanabilir (Domínguez ve Edwards, 2011; McBride, 1994). Aynı şekilde HKF+AG (1.98 mg/kg) ve HKF+Biochar (1.88 mg/kg) gruplarında da yüksek Cu düzeyleri kaydedilmiştir. Biochar uygulanan gruplarda Cu düzeyinin yükselmesi, kısa vadeli iyon salımı ve yüzey çözünürlüğüyle ilişkili olabilir (Beesley ve ark., 2011). Nötr toprak koşullarında en yüksek Cu değeri 1.66 mg/kg ile HKF+AG uygulamasında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Ahır gübresi çözünür organik ligandlar ve şelatlayıcı organik

Çizelge 4.71. Bitki denemesi topraklarının alınabilir Cu analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Cu (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 1.48       | 1.58 | 1.52 | 0.04      | 0.00    | 2.63              | 1.19               | 1.50  |
|        | TSP              | 1.60       | 1.62 | 1.61 | 0.01      | 0.00    | 0.62              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP+Biochar      | 1.80       | 1.82 | 1.82 | 0.01      | 0.00    | 0.55              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+Vermikompost | 1.38       | 1.76 | 1.54 | 0.17      | 0.03    | 11.04             | 0.97               | 0.10  |
|        | TSP+AG           | 1.40       | 1.98 | 1.63 | 0.25      | 0.06    | 15.34             | 1.17               | 1.16  |
|        | HKF              | 1.48       | 1.94 | 1.64 | 0.22      | 0.05    | 13.41             | 1.37               | 1.28  |
|        | HKF+Biochar      | 1.74       | 2.10 | 1.88 | 0.15      | 0.02    | 7.98              | 1.38               | 2.36  |
|        | HKF+Vermikompost | 1.96       | 2.32 | 2.12 | 0.19      | 0.04    | 8.96              | 0.16               | -5.11 |
|        | HKF+AG           | 1.66       | 2.20 | 1.98 | 0.25      | 0.06    | 12.63             | -0.59              | -2.51 |
| Nötr   | Kontrol          | 1.06       | 1.18 | 1.13 | 0.06      | 0.00    | 5.31              | -0.08              | -5.52 |
|        | TSP              | 1.18       | 1.44 | 1.31 | 0.12      | 0.01    | 9.16              | 0.17               | -2.79 |
|        | TSP+Biochar      | 1.44       | 1.60 | 1.54 | 0.07      | 0.01    | 4.55              | -1.33              | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 1.42       | 1.50 | 1.47 | 0.03      | 0.00    | 2.04              | -1.54              | 2.89  |
|        | TSP+AG           | 1.50       | 1.60 | 1.55 | 0.04      | 0.00    | 2.58              | 0.00               | 0.39  |
|        | HKF              | 1.44       | 1.60 | 1.54 | 0.07      | 0.00    | 4.55              | -1.20              | 1.98  |
|        | HKF+Biochar      | 1.12       | 1.44 | 1.29 | 0.14      | 0.02    | 10.85             | -0.32              | -1.60 |
|        | HKF+Vermikompost | 0.94       | 1.36 | 1.21 | 0.20      | 0.04    | 16.53             | -1.10              | -0.05 |
|        | HKF+AG           | 1.62       | 1.68 | 1.66 | 0.03      | 0.00    | 1.81              | -0.37              | -3.90 |
| Bazik  | Kontrol          | 2.70       | 2.74 | 2.71 | 0.02      | 0.00    | 0.74              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP              | 3.50       | 3.58 | 3.54 | 0.03      | 0.00    | 0.85              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 3.50       | 3.58 | 3.53 | 0.04      | 0.00    | 1.13              | 0.85               | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 3.34       | 3.50 | 3.43 | 0.07      | 0.00    | 2.04              | -0.88              | 1.93  |
|        | TSP+AG           | 3.56       | 3.64 | 3.59 | 0.04      | 0.00    | 1.11              | 1.66               | 2.62  |
|        | HKF              | 3.76       | 3.86 | 3.80 | 0.04      | 0.00    | 1.05              | 1.72               | 3.26  |
|        | HKF+Biochar      | 3.40       | 3.48 | 3.44 | 0.03      | 0.00    | 0.87              | 0.75               | 0.34  |
|        | HKF+Vermikompost | 3.46       | 3.52 | 3.49 | 0.03      | 0.00    | 0.86              | 0.00               | -1.20 |
|        | HKF+AG           | 3.42       | 3.68 | 3.58 | 0.11      | 0.01    | 3.07              | -1.01              | 0.28  |

asitler sağlayarak Cu'un daha uzun süre çözeltide kalmasını sağlamıştır (García-Gil ve ark., 2000). Bunu TSP+AG (1.55 mg/kg) ve TSP+Biochar (1.54 mg/kg) uygulamaları takip etmiştir. Bazik toprakta en yüksek Cu değeri 3.80 mg/kg ile HKF uygulamasında elde edilmiştir ( $p<0.05$ ). Öğütülmüş fosfat kayasının bazik ortamda çözünerek Cu salımını desteklediği ve fiksasyonun beklenenin aksine sınırlı kaldığını göstermektedir. TSP+AG (3.59 mg/kg), HKF+AG (3.58 mg/kg) ve TSP (3.54 mg/kg) grupları da yüksek Cu seviyelerine sahip olmuştur. Kontrol grubunda ise Cu değeri 2.71 mg/kg olup, bu fark yapılan ilavelerin önemini ortaya koymaktadır. Özellikle bazik pH'nın Cu fiksasyonunu kolaylaştırdığı yapılan araştırmalarla bilinmektedir (Kabata-Pendias ve Mukherjee, 2007).

Çizelge 4.72. Bitki denemesi topraklarının alınabilir Cu analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Cu (mg/kg) |         |         |
|------------------|------------|---------|---------|
|                  | Asidik     | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 1.52 d     | 1.13 d  | 2.71 e  |
| TSP              | 1.61 cd    | 1.31 c  | 3.54 bc |
| TSP+Biochar      | 1.82 bc    | 1.54 ab | 3.53 bc |
| TSP+Vermikompost | 1.54 d     | 1.47 b  | 3.43 d  |
| TSP+AG           | 1.63 cd    | 1.55 ab | 3.59 b  |
| HKF              | 1.64 cd    | 1.54 ab | 3.80 a  |
| HKF+Biochar      | 1.88 abc   | 1.29 c  | 3.44 d  |
| HKF+Vermikompost | 2.12 a     | 1.21 cd | 3.49 cd |
| HKF+AG           | 3.73 ab    | 1.66 a  | 3.58 b  |

HKF+Vermikompost uygulaması, asidik toprakta Cu mobilizasyonunu en çok artıran uygulama olmuştur. Nötr ve bazik toprakta HKF+AG uygulaması alınabilir Cu seviyesini güvenli aralıkta tutarak mikro besin sağlanmasında etkili olmuştur.

#### 4.2.16. Toprakta alınabilir Mn analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Bitki denemesi topraklarının Mn analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.73’de verilmiştir. Bitki denemesi topraklarının toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın Mn içeriği değişim katsayısının HKF ve HKF+Vermikompost gruplarında orta derece değişkenlik gösterdiği diğer gruplarda ise düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Nötr topraklarda HKF ve HKF+AG gruplarının orta derece, diğer grupların ise düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır. Bazik toprakta TSP, TSP+Vermikompost, TSP+AG ve HKF+Vermikompost gruplarının orta derece, diğer grupların ise düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta yalnız Kontrol grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta TSP+Biochar grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+AG ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta HKF ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik toprata Mn’da normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik toprak uygulama sonuçları incelendiğinde toplam Mn’nın normal dağılım gösterdiği görülmüştür (Çizelge 4.73).

Bitki denemesi Mn analiz sonuçları Çizelge 4.74’de verilmiştir. Asidik toprak koşullarında en yüksek Mn değeri 24.20 mg/kg olarak HKF+Biochar uygulamasında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). En düşük Mn değeri 8.55 mg/kg ile kontrol grubunda gözlenmiştir. TSP uygulamaları ise 17.75 ile 20.12 mg/kg aralığında değişerek orta düzeyde Mn alınabilirliği sağlamıştır. Nötr pH koşullarında en yüksek Mn 5.59 mg/kg ile HKF+AG uygulamasında elde edilmiştir ( $p<0.05$ ). Bu uygulamada organik materyalin mikrobiyal aktiviteyi teşvik ederek Mn oksitlerinin çözünürlüğünü artırdığı söylenebilir (George ve ark., 2006). En düşük Mn 2.36 mg/kg ile kontrol grubunda gözlenmiştir.

Çizelge 4.73. Bitki denemesi topraklarının alınabilir Mn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Mn (mg/kg) |       |       |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------------|-------|-------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.       | Max.  | Ort.  | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 7.44       | 9.24  | 8.55  | 0.78      | 0.61    | 9.12              | -1.41              | 2.32  |
|        | TSP              | 20.06      | 20.16 | 20.12 | 0.05      | 0.00    | 0.25              | -0.54              | -2.94 |
|        | TSP+Biochar      | 21.62      | 21.96 | 21.82 | 0.15      | 0.02    | 0.69              | -1.10              | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 16.04      | 19.32 | 17.75 | 1.36      | 1.86    | 7.66              | -0.27              | 0.55  |
|        | TSP+AG           | 17.64      | 21.12 | 18.93 | 1.56      | 2.44    | 8.24              | 1.34               | 1.41  |
|        | HKF              | 9.38       | 15.22 | 12.05 | 2.46      | 6.07    | 20.41             | 0.55               | 0.32  |
|        | HKF+Biochar      | 21.70      | 26.34 | 24.20 | 1.91      | 3.64    | 7.89              | -0.55              | 1.57  |
|        | HKF+Vermikompost | 10.84      | 16.94 | 14.18 | 2.51      | 6.32    | 17.70             | -0.67              | 1.72  |
|        | HKF+AG           | 17.90      | 19.28 | 18.70 | 0.58      | 0.34    | 3.10              | -0.97              | 1.32  |
| Nötr   | Kontrol          | 2.14       | 2.86  | 2.39  | 0.34      | 0.12    | 14.23             | 1.23               | 0.62  |
|        | TSP              | 3.34       | 4.58  | 3.88  | 0.55      | 0.30    | 14.18             | 0.63               | -1.31 |
|        | TSP+Biochar      | 3.72       | 4.30  | 4.10  | 0.26      | 0.07    | 6.34              | -1.54              | 2.30  |
|        | TSP+Vermikompost | 3.66       | 4.10  | 3.88  | 0.18      | 0.03    | 4.64              | 0.00               | 0.57  |
|        | TSP+AG           | 4.66       | 4.72  | 4.69  | 0.03      | 0.00    | 0.64              | 0.37               | -3.90 |
|        | HKF              | 2.36       | 3.54  | 3.04  | 0.52      | 0.27    | 17.11             | -0.71              | -0.99 |
|        | HKF+Biochar      | 3.92       | 4.56  | 4.25  | 0.27      | 0.08    | 6.35              | -0.18              | -0.90 |
|        | HKF+Vermikompost | 3.78       | 4.46  | 4.11  | 0.35      | 0.12    | 8.52              | 0.08               | -5.26 |
|        | HKF+AG           | 4.66       | 6.78  | 5.59  | 0.89      | 0.79    | 15.92             | 0.80               | 1.14  |
| Bazik  | Kontrol          | 1.98       | 2.46  | 2.19  | 0.20      | 0.04    | 9.13              | 0.97               | 1.65  |
|        | TSP              | 2.18       | 4.36  | 3.59  | 0.97      | 0.93    | 27.02             | -1.64              | 2.91  |
|        | TSP+Biochar      | 2.22       | 3.22  | 2.73  | 0.37      | 0.14    | 13.55             | -0.92              | 1.86  |
|        | TSP+Vermikompost | 1.74       | 2.78  | 2.25  | 0.43      | 0.18    | 19.11             | 0.13               | 0.83  |
|        | TSP+AG           | 3.84       | 5.48  | 4.56  | 0.72      | 0.52    | 15.79             | 0.62               | -1.10 |
|        | HKF              | 3.64       | 4.52  | 4.02  | 0.42      | 0.17    | 10.45             | 0.46               | -3.11 |
|        | HKF+Biochar      | 4.10       | 4.56  | 4.32  | 0.19      | 0.04    | 4.40              | 0.46               | 1.40  |
|        | HKF+Vermikompost | 3.66       | 5.54  | 4.52  | 0.84      | 0.70    | 18.58             | 0.39               | -2.12 |
|        | HKF+AG           | 3.74       | 4.44  | 4.02  | 0.31      | 0.10    | 7.71              | 1.14               | 0.76  |

HKF+Vermikompost, HKF+Biochar ve TSP+AG gibi uygulamalar en yüksek Mn içeriğine sahip olmuştur. Bazık toprakta Mn'un alınabilirliği genellikle düşük olup  $Mn^{+2}$  formu hızla oksitlenerek çözünmeyen  $MnO_2$  bileşiklerine dönüşür. Bu çalışmada ise bu sınırlamaya rağmen TSP+AG (4.56 mg/kg) ve HKF+Vermikompost (4.52 mg/kg) uygulamalarında en yüksek Mn değerleri tespit edilmiştir. Organik materyaller mikrobiyal oksijen tüketimini artırarak redoks potansiyelini düşürebilir ve bu sayede  $Mn^{+4}$ 'den  $Mn^{+2}$ 'ye dönüşümü kolaylaştırabilir (Hue, 1992). Biochar uygulaması Mn'un redoks dengesini etkileyebilecek alkalın yüzey özellikleri nedeniyle daha düşük düzeyde Mn salımı sağlamıştır (Glaser ve ark., 2002).

Çizelge 4.74. Bitki denemesi topraklarının alınabilir Mn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Mn (mg/kg) |         |         |
|------------------|------------|---------|---------|
|                  | Asidik     | Nötr    | Bazık   |
| Kontrol          | 8.55 e     | 2.39 d  | 2.19 c  |
| TSP              | 20.12 bc   | 3.88 c  | 3.59 b  |
| TSP+Biochar      | 21.82 b    | 4.10 bc | 2.73 c  |
| TSP+Vermikompost | 17.75 c    | 3.88 c  | 2.25 c  |
| TSP+AG           | 18.93 c    | 4.69 b  | 4.56 a  |
| HKF              | 12.05 d    | 3.04 d  | 4.02 ab |
| HKF+Biochar      | 24.20 a    | 4.25 bc | 4.32 ab |
| HKF+Vermikompost | 14.18 d    | 4.11 bc | 4.52 a  |
| HKF+AG           | 18.69 c    | 5.59 a  | 4.02 ab |

#### 4.2.17. Toprakta alınabilir B analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprakların özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın B içeriği değişim katsayısı HKF+Biochar grubunda orta derece değişkenlik gösterdiği, diğer gruplarda ise düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.75). Nötr ve bazik topraklarda ise tüm grupların düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta Kontrol, TSP, TSP+Vermikompost ve HKF gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer uygulama gruplarının ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta HKF+AG grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP, TSP+Biochar ve HKF+Biochar gruplarının normal dağılım gösterdiği, diğer grupların dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir. Bazik toprakta ise yalnızca HKF+Biochar grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, Kontrol, TSP ve TSP+AG gruplarının normal dağılım gösterdiği ve diğer grupların ise dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprağın bitki denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre B'da normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.75).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki B içeriğinde anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.76). Asidik toprakta en yüksek B değeri 0.99 mg/kg ile HKF uygulamasında ölçülmüş, bunu 0.95 mg/kg ile HKF+AG uygulaması takip etmiştir ( $p<0.05$ ). Fosfat kayası B içeriği bakımından zengin olabilir, ayrıca düşük pH koşulları borun çözünürlüğünü yükseltebilir (Goldberg ve Suarez, 2006). Nötr pH'da en yüksek B değeri 0.91 mg/kg ile HKF ve 0.88 mg/kg ile HKF+AG uygulamalarında ölçülmüştür. Fosfor ilevesi ve organik materyal borun çözünür formda tutulmasına katkı sağlamaktadır. En düşük B değeri 0.49 mg/kg ile kontrol grubunda ölçülmüştür. Bazik toprakta en yüksek B düzeyi 2.88 mg/kg ile HKF uygulamasında gözlenmiştir ( $p<0.05$ ). Bu sonuç, kireçli ve yüksek pH'lı koşullarda dahi öğütülmüş fosfat kayasının B çözünürlüğüne katkı sağladığını ortaya koymaktadır. HKF+AG (2.56 mg/kg) ve HKF+Vermikompost (2.51 mg/kg) uygulamaları da yüksek değerler sunarak organik katkıların Ca ile olan rekabeti dengeleyebildiğini göstermektedir.

Çizelge 4.75. Bitki denemesi topraklarının alınabilir B analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | B (mg/kg) |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|-----------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.      | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 0.45      | 0.46 | 0.45 | 0.01      | 0.00    | 2.22              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP              | 0.45      | 0.50 | 0.49 | 0.03      | 0.00    | 6.12              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP+Biochar      | 0.45      | 0.55 | 0.49 | 0.05      | 0.00    | 10.20             | 0.85               | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 0.50      | 0.55 | 0.51 | 0.03      | 0.00    | 5.88              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP+AG           | 0.70      | 0.80 | 0.75 | 0.04      | 0.00    | 5.33              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF              | 0.95      | 1.00 | 0.99 | 0.03      | 0.00    | 3.03              | -2.00              | 4.00  |
|        | HKF+Biochar      | 0.40      | 0.70 | 0.55 | 0.13      | 0.02    | 23.64             | 0.00               | -1.20 |
|        | HKF+Vermikompost | 0.70      | 0.80 | 0.75 | 0.04      | 0.00    | 5.33              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF+AG           | 0.90      | 1.00 | 0.95 | 0.04      | 0.00    | 4.21              | 0.00               | 1.50  |
| Nötr   | Kontrol          | 0.45      | 0.50 | 0.49 | 0.03      | 0.00    | 6.12              | -2.00              | 4.00  |
|        | TSP              | 0.45      | 0.55 | 0.50 | 0.04      | 0.00    | 8.00              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 0.45      | 0.55 | 0.51 | 0.05      | 0.00    | 9.80              | -0.85              | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 0.55      | 0.60 | 0.56 | 0.03      | 0.00    | 5.36              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP+AG           | 0.60      | 0.65 | 0.64 | 0.03      | 0.00    | 4.69              | -2.00              | 4.00  |
|        | HKF              | 0.90      | 0.95 | 0.91 | 0.03      | 0.00    | 3.30              | 2.00               | 4.00  |
|        | HKF+Biochar      | 0.50      | 0.60 | 0.55 | 0.04      | 0.00    | 7.27              | 0.00               | 1.50  |
|        | HKF+Vermikompost | 0.60      | 0.65 | 0.61 | 0.03      | 0.00    | 4.92              | 2.00               | 4.00  |
|        | HKF+AG           | 0.85      | 0.92 | 0.88 | 0.04      | 0.00    | 4.55              | 0.27               | -4.48 |
| Bazik  | Kontrol          | 2.25      | 2.40 | 2.35 | 0.07      | 0.00    | 2.98              | -1.41              | 1.50  |
|        | TSP              | 2.40      | 2.50 | 2.45 | 0.04      | 0.00    | 1.63              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Biochar      | 2.40      | 2.45 | 2.44 | 0.02      | 0.00    | 0.82              | -1.78              | 3.13  |
|        | TSP+Vermikompost | 2.40      | 2.55 | 2.46 | 0.06      | 0.00    | 2.44              | 1.13               | 2.23  |
|        | TSP+AG           | 2.35      | 2.65 | 2.51 | 0.13      | 0.02    | 5.18              | -0.56              | 0.93  |
|        | HKF              | 2.80      | 2.90 | 2.88 | 0.05      | 0.00    | 1.74              | -2.00              | 4.00  |
|        | HKF+Biochar      | 2.35      | 2.40 | 2.38 | 0.03      | 0.00    | 1.26              | 0.00               | -6.00 |
|        | HKF+Vermikompost | 2.50      | 2.55 | 2.51 | 0.02      | 0.00    | 0.80              | 2.00               | 4.00  |
|        | HKF+AG           | 2.55      | 2.60 | 2.56 | 0.03      | 0.00    | 1.17              | 2.00               | 4.00  |

Çizelge 4.76. Bitki denemesi topraklarının alınabilir B analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | B (mg/kg) |          |          |
|------------------|-----------|----------|----------|
|                  | Asidik    | Nötr     | Bazik    |
| Kontrol          | 0.45 d    | 0.49 e   | 2.35 e   |
| TSP              | 0.49 cd   | 0.50 de  | 2.45 cd  |
| TSP+Biochar      | 0.49 cd   | 0.50 cde | 2.37 cde |
| TSP+Vermikompost | 0.51 cd   | 0.56 c   | 2.46 cd  |
| TSP+AG           | 0.75 b    | 0.64 b   | 2.51 bc  |
| HKF              | 0.99 a    | 0.91 a   | 2.88 a   |
| HKF+Biochar      | 0.60 c    | 0.55 cd  | 2.38 de  |
| HKF+Vermikompost | 0.75 b    | 0.61 b   | 2.51 bc  |
| HKF+AG           | 0.95 a    | 0.88 a   | 2.56 b   |

HKF, üç toprak reaksiyonunda da bor içeriğini artırarak en etkili uygulama olmuştur. Organik materyallerle kombine edilen HKF, bazik topraklarda B'un çözünürlüğü artırarak yararlılığını desteklemiştir. Biochar, B alınabilirliği üzerinde kısa vadede sınırlayıcı olabilir; özellikle düşük B içeriğine sahip topraklarda dikkatle kullanılmalıdır (Beesley ve ark., 2011).

#### 4.2.18. Toprak mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak mikrobiyal biyokütle karbonu (MBC), toprak ekosisteminde bulunan aktif mikrobiyal fraksiyonun büyüklüğünü ifade eden ve toprak biyolojik verimliliğinin en duyarlı göstergelerinden biridir. MBC, karbon döngüsünün önemli bir bileşeni olmakla birlikte, toprakta organik maddenin ayrışması, besin elementlerinin mineralizasyonu ve enzimatik aktivite süreçlerini doğrudan etkiler (Joergensen ve Wichern, 2008; Anderson ve Domsch, 1990).

Bitki denemesi topraklarının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.77’de verilmiştir. Bitki denemesi topraklarının değişkenlik katsayısı incelendiğinde, asidik ve nötr toprağın mikrobiyal biyokütlesi üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bazik topraklarda ise Kontrol ve HKF grupları orta derece değişkenlik gösterirken, diğer grupların düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta TSP+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, yalnız HKF grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise kontrol grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta HKF grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Vermikompost grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu ve diğer tüm grupların normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerleri (skewness) asidik, nötr ve bazik toprata mikrobiyal biyoküttelede normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.77).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki mikrobiyal biyoküttelede anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.78). Asidik toprakta en yüksek MBC değeri  $0.91 \text{ mg C g}^{-1}$  toprak ile HKF+Vermikompost uygulamasında elde edilmiştir. Bunu sırasıyla TSP+AG ( $0.89 \text{ mg C g}^{-1}$ ) ve HKF+AG ( $0.88 \text{ mg C g}^{-1}$ ) uygulamaları izlemiştir. Bu sonuçlar, düşük çözünürlüklü fosfat kayasının mikrobiyal substratlarla birlikte çözünmesinin teşvik edildiğini, vermikompost ve ahır gübresinin mikrobiyal aktiviteyi uyatarak MBC’yi artırdığını göstermektedir (Domínguez ve Edwards, 2011; Tejada ve

Çizelge 4.77. Bitki denemesi topraklarının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak        | Uygulamalar      | Mikrobiyal Biyokütle C (mg C / g <sup>-1</sup> Toprak) |      |      |           |         |                   |                    |          |
|---------------|------------------|--------------------------------------------------------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|----------|
|               |                  | Min.                                                   | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |          |
|               |                  |                                                        |      |      |           |         |                   | Skewness           | Kurtosis |
| <b>Asidik</b> | Kontrol          | 0.29                                                   | 0.34 | 0.31 | 0.03      | 0.00    | 8.71              | 0.88               | -1.14    |
|               | TSP              | 0.51                                                   | 0.57 | 0.54 | 0.02      | 0.00    | 4.26              | -0.06              | 1.50     |
|               | TSP+Biochar      | 0.66                                                   | 0.74 | 0.69 | 0.04      | 0.00    | 5.22              | 1.11               | 2.20     |
|               | TSP+Vermikompost | 0.71                                                   | 0.80 | 0.76 | 0.04      | 0.00    | 4.87              | 0.00               | -1.10    |
|               | TSP+AG           | 0.83                                                   | 0.94 | 0.89 | 0.05      | 0.00    | 5.39              | -0.75              | 0.38     |
|               | HKF              | 0.49                                                   | 0.57 | 0.54 | 0.04      | 0.00    | 7.78              | -0.36              | -3.95    |
|               | HKF+Biochar      | 0.54                                                   | 0.60 | 0.57 | 0.02      | 0.00    | 4.04              | 0.06               | 1.50     |
|               | HKF+Vermikompost | 0.86                                                   | 0.94 | 0.91 | 0.04      | 0.00    | 4.51              | -1.40              | 1.44     |
|               | HKF+AG           | 0.83                                                   | 0.91 | 0.88 | 0.04      | 0.00    | 4.09              | -1.15              | 2.26     |
| <b>Nötr</b>   | Kontrol          | 0.26                                                   | 0.34 | 0.31 | 0.04      | 0.00    | 11.61             | -1.11              | 2.20     |
|               | TSP              | 0.34                                                   | 0.40 | 0.38 | 0.03      | 0.00    | 7.11              | -0.83              | -1.44    |
|               | TSP+Biochar      | 0.63                                                   | 0.69 | 0.66 | 0.02      | 0.00    | 3.48              | 0.06               | 1.50     |
|               | TSP+Vermikompost | 0.71                                                   | 0.80 | 0.76 | 0.04      | 0.00    | 4.87              | 0.00               | 1.10     |
|               | TSP+AG           | 0.80                                                   | 0.89 | 0.86 | 0.04      | 0.00    | 4.77              | -1.40              | 1.44     |
|               | HKF              | 0.40                                                   | 0.49 | 0.44 | 0.04      | 0.00    | 8.41              | 0.00               | -1.10    |
|               | HKF+Biochar      | 0.60                                                   | 0.69 | 0.64 | 0.04      | 0.00    | 5.78              | 0.00               | -1.10    |
|               | HKF+Vermikompost | 0.71                                                   | 0.77 | 0.75 | 0.03      | 0.00    | 3.60              | -0.88              | -1.14    |
|               | HKF+AG           | 0.86                                                   | 0.91 | 0.89 | 0.02      | 0.00    | 2.58              | -0.06              | 1.50     |
| <b>Bazik</b>  | Kontrol          | 0.11                                                   | 0.20 | 0.16 | 0.04      | 0.00    | 23.13             | 0.00               | -1.10    |
|               | TSP              | 0.20                                                   | 0.26 | 0.23 | 0.02      | 0.00    | 10.00             | -0.06              | 1.50     |
|               | TSP+Biochar      | 0.43                                                   | 0.51 | 0.47 | 0.04      | 0.00    | 7.87              | 0.00               | -1.30    |
|               | TSP+Vermikompost | 0.63                                                   | 0.71 | 0.68 | 0.04      | 0.00    | 5.29              | -1.15              | 2.26     |
|               | TSP+AG           | 0.71                                                   | 0.80 | 0.76 | 0.04      | 0.00    | 4.87              | 0.00               | -1.10    |
|               | HKF              | 0.20                                                   | 0.29 | 0.24 | 0.04      | 0.00    | 15.42             | 0.00               | -1.10    |
|               | HKF+Biochar      | 0.26                                                   | 0.31 | 0.29 | 0.02      | 0.00    | 7.93              | -0.06              | 1.50     |
|               | HKF+Vermikompost | 0.60                                                   | 0.66 | 0.64 | 0.03      | 0.00    | 4.22              | -0.88              | -1.14    |
|               | HKF+AG           | 0.57                                                   | 0.69 | 0.62 | 0.06      | 0.00    | 9.52              | 0.20               | -4.84    |

Benítez, 2006). Nötr toprakta en yüksek MBC değeri  $0.89 \text{ mg C g}^{-1}$  ile HKF+AG ve bunu TSP+AG ve TSP+Vermikompost uygulamaları takip etmiştir. Biochar ilave edilen gruplarda MBC düzeyi orta seviyede kalmıştır. Bu durum biocharın MBC kısa vadede doğrudan artırmadığını, ancak karbon stabilitesini uzun vadede etkileyebileceğini göstermektedir (Lehmann ve Joseph, 2015). Bazık toprakta en yüksek MBC değeri  $0.76 \text{ mg C g}^{-1}$  ile TSP+AG uygulamasında elde edilmiştir. Bu uygulamayı TSP+Vermikompost ( $0.68 \text{ mg C g}^{-1}$ ) ve HKF+Vermikompost ( $0.64 \text{ mg C g}^{-1}$ ) grupları takip etmiştir. Bazık ortamlarda mikrobiyal çeşitlilik azalsada, uygun organik katkılarla enerji kaynağı sağlayarak bu olumsuz etkiyi telafi edebilir (Freitas ve ark., 2003).

Çizelge 4.78. Bitki denemesi topraklarının mikrobiyal biyokütle analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Mikrobiyal Biyokütle C ( $\text{mg C / g}^{-1}$ Toprak) |        |         |
|------------------|---------------------------------------------------------|--------|---------|
|                  | Asidik                                                  | Nötr   | Bazık   |
| Kontrol          | 0.31 e                                                  | 0.31 f | 0.16 g  |
| TSP              | 0.54 d                                                  | 0.38 e | 0.23 f  |
| TSP+Biochar      | 0.69 c                                                  | 0.66 c | 0.47 d  |
| TSP+Vermikompost | 0.76 b                                                  | 0.76 b | 0.68 b  |
| TSP+AG           | 0.89 a                                                  | 0.86 a | 0.76 a  |
| HKF              | 0.54 d                                                  | 0.44 d | 0.24 ef |
| HKF+Biochar      | 0.57 d                                                  | 0.64 c | 0.29 e  |
| HKF+Vermikompost | 0.91 a                                                  | 0.75 b | 0.64 bc |
| HKF+AG           | 0.88 a                                                  | 0.89 a | 0.62 c  |

Sonuç olarak, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gibi uygulamalar, mikrobiyal substrat ve çözünür fosfor sağladıkları için MBC seviyelerini artırmada etkili olmuştur. TSP+AG, bazık ve nötr toprakta mikrobiyal aktiviteyi maksimum düzeyde teşvik ederek, mısır gibi yüksek besin ihtiyacı olan bitkiler için ideal bir ortam sunmuştur. Biochar içeren gruplarda MBC düzeyleri orta seviyede kalmış olup, mikrobiyal aktiviteyi desteklemek için bu materyalin organik gübrelerle uygulanması önerilmektedir (Beesley ve ark., 2011).

#### 4.2.19. Toprak fosfataz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Fosfataz enzimleri, özellikle organik fosfor bileşiklerinin inorganik forma dönüşümünü sağlayan ve toprakta fosforun biyolojik olarak yararlanabilirliğini etkileyen önemli enzimlerdir (Richardson ve Simpson, 2011). Bu enzimlerin aktivitesi, toprak mikrobiyal aktivitesi, pH, fosfor fraksiyonları ve uygulanan materyallerin mikrobiyal aktiviteye etkisi ile doğrudan ilişkilidir (Nannipieri ve ark., 2011).

Bitki denemesi topraklarının fosfotaz enzimi analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.79'da verilmiştir. Toprakların özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik toprağın fosfotaz enzimi üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta HKF+Biochar grubunun dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta HKF grubunun dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, TSP+Biochar, TSP+Vermikompost, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta Kontrol ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP, HKF+Biochar ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği ve diğer tüm grupların normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Çarpıklık değerleri (skewness) asidik, nötr ve bazik topraklarda yapılan uygulamaların sonuçlarına göre fosfotaz enziminin normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.79).

Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki fosfotaz enziminde anlamlı değişime neden olmuştur (Çizelge 4.80). Asit toprak koşullarında en yüksek fosfataz aktivitesi  $126.24 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ toprak h}^{-1}$  ile TSP+Vermikompost ve  $125.27 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  ile HKF+AG uygulamasında ölçülmüştür ( $p < 0.05$ ). Bu iki uygulama, mikrobiyal besin zenginliği ve mikrobiyal aktiviteyi teşvik edici özellikleriyle fosfataz enzim üretimini maksimum olmasını teşvik etmiştir. Vermikompost gübresinin içerdiği kolay ayrışabilir karbon ve bazı enzimler, fosfataz aktivitesini artırıcı yönde etkili

Çizelge 4.79. Bitki denemesi topraklarının fosfotaz enzimi analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak        | Uygulamalar      | Fosfotaz Enzimi ( $\mu\text{g } p\text{-nitrofenil g}^{-1} \text{ toprak h}^{-1}$ ) |        |        |           |         |                   |                    |          |
|---------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-----------|---------|-------------------|--------------------|----------|
|               |                  | Min.                                                                                | Max.   | Ort.   | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |          |
|               |                  |                                                                                     |        |        |           |         |                   | Skewness           | Kurtosis |
| <b>Asidik</b> | Kontrol          | 44.15                                                                               | 48.50  | 46.59  | 1.83      | 3.35    | 3.93              | -0.80              | 1.06     |
|               | TSP              | 72.49                                                                               | 78.94  | 76.58  | 2.89      | 8.35    | 3.77              | -1.42              | 1.80     |
|               | TSP+Biochar      | 60.42                                                                               | 65.06  | 62.74  | 2.00      | 4.00    | 3.19              | 0.00               | -1.20    |
|               | TSP+Vermikompost | 124.71                                                                              | 129.35 | 126.24 | 2.19      | 4.80    | 1.74              | 1.46               | 1.72     |
|               | TSP+AG           | 80.56                                                                               | 85.98  | 83.65  | 2.45      | 6.00    | 2.93              | -0.63              | -1.70    |
|               | HKF              | 77.46                                                                               | 81.33  | 79.20  | 1.72      | 2.95    | 2.17              | 0.48               | -1.70    |
|               | HKF+Biochar      | 68.94                                                                               | 73.58  | 71.16  | 2.38      | 5.68    | 3.35              | 0.07               | -5.38    |
|               | HKF+Vermikompost | 102.24                                                                              | 108.44 | 105.92 | 2.64      | 6.95    | 2.49              | -1.20              | 1.98     |
|               | HKF+AG           | 123.16                                                                              | 127.74 | 125.27 | 1.91      | 3.63    | 1.52              | 0.52               | 0.88     |
| <b>Nötr</b>   | Kontrol          | 16.27                                                                               | 20.91  | 18.98  | 2.05      | 4.20    | 10.80             | -0.86              | -0.29    |
|               | TSP              | 48.02                                                                               | 52.09  | 49.82  | 1.80      | 3.24    | 3.61              | 0.59               | -1.31    |
|               | TSP+Biochar      | 27.11                                                                               | 29.43  | 28.47  | 1.16      | 1.35    | 4.08              | -0.37              | -3.90    |
|               | TSP+Vermikompost | 56.41                                                                               | 59.50  | 57.76  | 1.60      | 2.55    | 2.76              | 0.20               | -4.86    |
|               | TSP+AG           | 49.57                                                                               | 51.90  | 51.12  | 1.10      | 1.20    | 2.14              | -1.42              | 1.50     |
|               | HKF              | 45.27                                                                               | 48.80  | 47.72  | 1.69      | 2.84    | 3.53              | -1.74              | 2.96     |
|               | HKF+Biochar      | 29.43                                                                               | 34.08  | 31.56  | 1.94      | 3.75    | 6.13              | 0.56               | 0.93     |
|               | HKF+Vermikompost | 49.25                                                                               | 54.22  | 51.70  | 2.66      | 7.05    | 5.14              | 0.01               | -5.78    |
|               | HKF+AG           | 57.32                                                                               | 59.64  | 58.67  | 1.16      | 1.35    | 1.98              | -0.37              | -3.90    |
| <b>Bazik</b>  | Kontrol          | 22.46                                                                               | 26.34  | 24.21  | 2.04      | 4.15    | 8.41              | 0.12               | -5.29    |
|               | TSP              | 34.08                                                                               | 37.18  | 36.02  | 1.34      | 1.80    | 3.73              | -1.54              | 2.89     |
|               | TSP+Biochar      | 27.66                                                                               | 30.98  | 29.38  | 1.36      | 1.85    | 4.63              | -0.25              | 1.53     |
|               | TSP+Vermikompost | 64.06                                                                               | 67.39  | 65.98  | 1.42      | 2.03    | 2.16              | -0.91              | 0.73     |
|               | TSP+AG           | 59.00                                                                               | 61.97  | 60.26  | 1.28      | 1.64    | 2.12              | 0.88               | 0.44     |
|               | HKF              | 53.39                                                                               | 56.68  | 55.28  | 1.41      | 1.99    | 2.55              | -0.89              | 0.68     |
|               | HKF+Biochar      | 34.02                                                                               | 39.43  | 37.73  | 2.46      | 6.05    | 6.52              | -1.88              | 3.65     |
|               | HKF+Vermikompost | 65.39                                                                               | 68.94  | 67.28  | 1.59      | 2.52    | 2.36              | -0.29              | -2.38    |
|               | HKF+AG           | 62.29                                                                               | 66.61  | 64.76  | 1.80      | 3.24    | 2.78              | -0.98              | 2.05     |

olmaktadır (Domínguez ve Edwards, 2011). En düşük aktivite kontrol grubunda ( $46.59 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) ölçülmüş olup organik ve mineral madde ilave edilmeyen topraklarda mikrobiyal enzim üretiminin ciddi şekilde sınırlandığı belirtilmektedir (George ve ark., 2006). Nötr pH koşulları, hem mikrobiyal çeşitlilik hem de enzim aktivitesi açısından optimum pH aralığını temsil etmektedir (Rousk ve ark., 2009). Bu toprakta en yüksek fosfataz aktivitesi  $58.67 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  ile HKF+AG ve  $57.76 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  ile TSP+Vermikompost uygulamalarında ölçülmüştür ( $p<0.05$ ). Bu bulgular, hem çözünür fosfor kaynağının hem de organik maddenin birlikte uygulanmasının enzim aktivitesini desteklediğini ortaya koymaktadır. En düşük değer ise  $18.98 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$  ile kontrol grubunda ölçülmüş olup, fosforlu gübre ve organik materyallerin uygulanmadığı durumda biyolojik fosfor döngüsünün zayıf kaldığını göstermektedir (Richardson ve ark., 2009). Bazik pH, fosfataz enzimi aktivitesini teorik olarak sınırlasa da bu çalışmada uygulanan materyallerin bu etkiyi telafi ettiği görülmüştür. En yüksek değerler, TSP+Vermikompost ( $65.98 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), HKF+Vermikompost ( $67.28 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) ve HKF+AG ( $64.76 \mu\text{g p-NP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) uygulamaları istatistiksel olarak benzer bulunmuştur ( $p<0.05$ ). Organik materyallerin mikroorganizmaların yaşam ortamını düzenleyici etkisi yüksek pH koşullarında dahi enzim üretimini destekleyebildiğini göstermektedir (Tejada ve Benítez, 2006).

Çizelge 4.80. Bitki denemesi topraklarının fosfotaz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Fosfotaz Enzimi ( $\mu\text{g p-nitrofenil g}^{-1} \text{ toprak h}^{-1}$ ) |          |         |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------|---------|
|                  | Asidik                                                                      | Nötr     | Bazik   |
| Kontrol          | 46.59 g                                                                     | 18.98 f  | 24.21 f |
| TSP              | 76.58 d                                                                     | 49.82 bc | 36.02 d |
| TSP+Biochar      | 62.74 f                                                                     | 28.47 e  | 29.38 e |
| TSP+Vermikompost | 126.24 a                                                                    | 57.76 a  | 65.98 a |
| TSP+AG           | 83.65 c                                                                     | 51.12 b  | 60.26 b |
| HKF              | 79.20 d                                                                     | 47.72 c  | 55.28 c |
| HKF+Biochar      | 71.16 e                                                                     | 31.56 d  | 37.73 d |
| HKF+Vermikompost | 105.92 b                                                                    | 51.70 b  | 67.28 a |
| HKF+AG           | 125.27 a                                                                    | 58.67 a  | 64.76 a |

TSP+Vermikompost ve HKF+AG uygulamaları, üç farklı toprak koşulunda da yüksek fosfataz aktivitesi göstererek, organik P'nin mineralizasyonu açısından en iyi uygulama olmuştur. Fosfat kayası gibi düşük çözünür fosfor kaynakları, mikrobiyal aktiviteyi teşvik

eden organik materyallerle birlikte uygulandığında fosfor çözünürlüğünü ve enzimatik aktiviteyi artırmaktadır (Richardson ve Simpson, 2011).



#### 4.2.20. Toprak dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel veriler

Toprak dehidrogenaz enzimi (DHA), toprak mikrobiyal aktivitesinin ve canlılığının doğrudan biyokimyasal göstergesi olarak kabul edilir. Bu enzim, mikroorganizmaların enerji üretimi süreçlerinde görev almakta, aktif mikrobiyal metabolizmanın varlığını yansıtmaktadır (Burns ve ark., 2013). DHA, kısa vadeli toprak biyolojik kalitesinin izlenmesinde güvenilir bir parametre olarak kullanılmaktadır (Nannipieri ve ark., 2011). Bitki denemesi topraklarının dehidrogenaz enzim analiz sonuçları ve tanımlayıcı bazı istatistiksel değerleri Çizelge 4.81’de verilmiştir. Bitki denemesi topraklarının toprak özelliklerindeki değişkenlik incelendiğinde, asidik toprağın dehidrogenaz enzimi üzerindeki değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Yine aynı şekilde nötr ve bazik topraklarında düşük değişkenlik gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) asidik toprakta kontrol, TSP+Vermikompostve TSP+AG gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, HKF, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer uygulama gruplarının normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr toprakta ise TSP+Vermikompost, HKF ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu, kontrol, TSP+Biochar, TSP+AG, HKF+Biochar ve HKF+AG guplarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, diğer tüm grupların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta ise kontrol, TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost gruplarının dağılımının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğu, TSP+Biochar, TSP+AG, HKF ve HKF+AG gruplarının normal dağılım gösterdiği ve yalnızca TSP ve HKF+Biochar gruplarının dağılımının normalden sivri ve verilerin homojen olduğu görülmektedir.

Çarpıklık değerlerine (skewness) bakıldığında asidik, nötr ve bazik toprağın bitki denemesinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre dehidrogenaz enziminde normal dağılım gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.81). Bitki denemesi dehidrogenaz enzim analiz sonuçları Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ve testin sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4.82’de verilmiştir ( $p<0.05$ ). Farklı organik materyal ve fosforlu gübre uygulaması topraktaki dehidrogenaz enziminde anlamlı değişime neden olmuştur.

Çizelge 4.81. Bitki denemesi topraklarının dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Dehidrogenaz Enzimi ( $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ toprak 24 h <sup>-1</sup> ) |        |        |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min.                                                                       | Max.   | Ort.   | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 90.11                                                                      | 99.95  | 92.65  | 4.87      | 23.70   | 5.25              | 2.00               | 4.00  |
|        | TSP              | 101.43                                                                     | 107.26 | 103.98 | 2.51      | 6.30    | 2.41              | 0.71               | -0.11 |
|        | TSP+Biochar      | 90.11                                                                      | 96.86  | 92.53  | 3.08      | 9.47    | 3.33              | 1.38               | 1.44  |
|        | TSP+Vermikompost | 297.84                                                                     | 303.81 | 301.61 | 2.61      | 6.80    | 0.86              | -1.58              | 2.91  |
|        | TSP+AG           | 219.29                                                                     | 225.33 | 221.19 | 2.80      | 7.86    | 1.27              | 1.82               | 3.34  |
|        | HKF              | 211.33                                                                     | 219.30 | 215.39 | 3.89      | 15.15   | 1.81              | -0.04              | -4.80 |
|        | HKF+Biochar      | 121.84                                                                     | 127.83 | 124.42 | 2.51      | 6.30    | 2.02              | 0.93               | 1.55  |
|        | HKF+Vermikompost | 196.16                                                                     | 203.34 | 200.54 | 3.46      | 11.95   | 1.72              | -0.069             | -2.17 |
|        | HKF+AG           | 199.77                                                                     | 207.41 | 204.26 | 3.76      | 14.14   | 1.84              | -0.45              | -3.48 |
| Nötr   | Kontrol          | 98.69                                                                      | 103.66 | 101.18 | 2.87      | 8.25    | 2.84              | 0.00               | -6.00 |
|        | TSP              | 271.12                                                                     | 279.09 | 274.57 | 3.37      | 11.37   | 1.23              | 0.85               | 1.02  |
|        | TSP+Biochar      | 196.57                                                                     | 202.52 | 199.55 | 2.68      | 7.18    | 1.34              | -0.01              | -2.90 |
|        | TSP+Vermikompost | 339.94                                                                     | 343.02 | 342.18 | 1.50      | 2.24    | 0.44              | -1.99              | 3.97  |
|        | TSP+AG           | 271.92                                                                     | 274.31 | 272.91 | 1.20      | 1.43    | 0.44              | 0.37               | -3.90 |
|        | HKF              | 271.12                                                                     | 274.22 | 272.13 | 1.46      | 2.14    | 0.54              | 1.53               | 2.02  |
|        | HKF+Biochar      | 218.30                                                                     | 223.28 | 221.06 | 2.60      | 6.75    | 1.18              | -0.15              | -5.16 |
|        | HKF+Vermikompost | 322.95                                                                     | 328.47 | 326.54 | 2.47      | 6.12    | 0.76              | -1.63              | 2.74  |
|        | HKF+AG           | 298.12                                                                     | 306.94 | 302.19 | 4.27      | 18.19   | 1.41              | 0.21               | -4.34 |
| Bazik  | Kontrol          | 661.85                                                                     | 670.62 | 666.58 | 4.32      | 18.62   | 0.65              | -0.18              | -4.64 |
|        | TSP              | 768.70                                                                     | 771.89 | 769.82 | 1.42      | 2.03    | 0.18              | 1.64               | 2.84  |
|        | TSP+Biochar      | 629.95                                                                     | 637.93 | 633.40 | 3.39      | 11.51   | 0.54              | 0.84               | 0.73  |
|        | TSP+Vermikompost | 798.59                                                                     | 805.38 | 801.72 | 3.19      | 10.18   | 0.40              | 0.26               | -3.70 |
|        | TSP+AG           | 793.10                                                                     | 802.31 | 797.82 | 3.79      | 14.33   | 0.47              | -0.18              | 1.14  |
|        | HKF              | 901.07                                                                     | 909.05 | 906.30 | 3.73      | 13.91   | 0.41              | -1.34              | 1.17  |
|        | HKF+Biochar      | 766.31                                                                     | 770.67 | 768.09 | 1.84      | 3.39    | 0.24              | 1.22               | 2.25  |
|        | HKF+Vermikompost | 898.38                                                                     | 902.20 | 900.49 | 1.82      | 3.30    | 0.20              | -0.33              | -3.70 |
|        | HKF+AG           | 834.20                                                                     | 839.28 | 837.19 | 2.18      | 4.74    | 0.26              | -1.09              | 1.35  |

Asidik toprakta en yüksek DHA değeri 301.61  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$  ile TSP+Vermikompost uygulamasında ölçülmüş; bu değer, kontrol grubunun yaklaşık 3 katı düzeyindedir. TSP+AG (221.19  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) ve HKF+Vermikompost (200.54  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) uygulamaları da yüksek DHA seviyeleri sağlamıştır. En düşük DHA değerleri kontrol (92.65  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) ve TSP+Biochar (92.53  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) gruplarında gözlenmiştir. Nötr toprakta en yüksek DHA değeri 342.18  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$  ile TSP+Vermikompost uygulamasında ölçülmüş, bunu HKF+Vermikompost (326.54  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) ve HKF+AG (302.19  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) uygulamaları takip etmiştir. Bazık toprakta en yüksek DHA değeri 906.30  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$  ile HKF grubunda ölçülmüştür. Bunu HKF+Vermikompost (900.49  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) ve HKF+AG (837.19  $\mu\text{g TPF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ ) uygulamaları takip etmiştir.

Çizelge 4.82. Bitki denemesi topraklarının dehidrogenaz enzimi analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Dehidrogenaz Enzimi ( $\mu\text{g TPF g}^{-1}$ toprak 24 h <sup>-1</sup> ) |          |          |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------|----------|
|                  | Asidik                                                                     | Nötr     | Bazık    |
| Kontrol          | 92.65 g                                                                    | 101.18 g | 666.58 f |
| TSP              | 103.98 f                                                                   | 274.57 d | 769.82 e |
| TSP+Biochar      | 92.53 g                                                                    | 199.55 f | 633.40 g |
| TSP+Vermikompost | 301.61 a                                                                   | 342.18 a | 801.72 d |
| TSP+AG           | 221.19 b                                                                   | 272.91 d | 797.82 d |
| HKF              | 215.39 c                                                                   | 272.13 d | 906.30 a |
| HKF+Biochar      | 124.42 e                                                                   | 221.06 e | 768.09 e |
| HKF+Vermikompost | 200.54 d                                                                   | 326.54 b | 900.49 b |
| HKF+AG           | 204.26 d                                                                   | 302.19 c | 837.19 c |

Bütün bu sonuçlar değerlendirildiğinde, TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost uygulamaları, üç farklı pH koşulunda da en yüksek DHA düzeylerine ulaşarak mikrobiyal aktiviteyi en üst düzeye taşıyan uygulamalar olarak öne çıkmaktadır. Ahır gübresi uygulaması, özellikle nötr ve bazık topraklarda enzim aktivitesini artırmada etkili olmuştur. Biochar ilavesi, kısa vadede mikrobiyal ve enzimatik süreçlerde sınırlayıcı etkiler gösterebilmekte olup, substrat zenginleştirilmesi ile birlikte uygulanması önerilmektedir (Beesley ve ark., 2011).

### 4.3. Mısır Bitkisi Analiz Sonuçları

Bitki özelliklerindeki değişkenlik değişim katsayılarına göre üç grupta incelenmiştir. Yüzde değişim katsayısı 15'ten küçük olanlar düşük derece değişken, 16-35 arası olanlar orta derece değişken ve 36'dan büyük olanlar yüksek derecede değişken olarak değerlendirilmiştir (Upchurch ve ark.,1988).

Basıklık değeri (kurtosis)  $< 0$  ise dağılım normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen olduğuna işaret ederken, sıfıra eşit değerler dağılımın basıklığı normal dağılım kadar olduğunu ve  $> 0$  değerler ise dağılım normalden sivri ve verilerin homojen olduğunu göstermektedir. Çoğu istatistikçi  $\pm 2$  saçılımını normal varsaymaktadır.

Çarpıklık değeri (skewness) normal dağılımda 0 olarak varsayılır. Bir dağılımın çarpıklık katsayısı negatif ise dağılım sağa, pozitif ise sola çarpıktır.  $\pm 2$  saçılımı çoğu istatistikçi tarafından normal varsayılmaktadır.

Ayrıca mısır bitkisinin besin elementi sınır değerleri Çizelge 4.83'de verilmiştir ve elde edilen sonuçlar bu değerlere göre incelenmiştir.

Çizelge 4.83. Mısır bitkisinin (yeşil gövde kuru maddesi için) besin elementi sınır değerleri (Jones, ve ark 1991).

| ELEMENT                   | AZ    | YETER     | FAZLA |
|---------------------------|-------|-----------|-------|
| N (%)                     | <3.50 | 3.50-5.00 | >5.00 |
| P (%)                     | <0.30 | 0.30-0.50 | >0.50 |
| K (%)                     | <2.50 | 2.50-4.00 | >4.00 |
| Ca (%)                    | <0.30 | 0.30-0.70 | >0.70 |
| Mg (%)                    | <0.15 | 0.15-0.45 | >0.45 |
| S (%)                     | <0.15 | 0.15-0.50 | >0.50 |
| Fe (mg kg <sup>-1</sup> ) | <50   | 50-250    | >250  |
| Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) | <20   | 20-60     | >60   |
| Mn (mg kg <sup>-1</sup> ) | <20   | 20-300    | >300  |
| Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) | <5    | 5-20      | >20   |
| B (mg kg <sup>-1</sup> )  | <5.0  | 5.0-25    | >25   |

#### 4.3.1. Mısır bitkisinin yaş ve kuru ağırlıkları ortalamaları

Deneme sonunda hasat edilen mısır bitkilerinin yaş ağırlıkları alınmıştır (Çizelge 4.84). Bitkiler yıkanarak 48 saat süre ile 65°C'ye ayarlı etüvde kurutulmuş ve bitkilerin kuru ağırlıkları tartılarak belirlenmiştir (Çizelge 4.85).

Asidik toprakların bitki yaş ağırlığına etkisine baktığımızda, biochar ve vermikompost gibi organik maddelerin, bitkinin su tutma kapasitesini ve kök hacmini arttırdığı ve mısırın yaş ağırlığını olumlu etkilediği gözlemlenmiştir (Çizelge 4.84). özellikle TSP+Vermikompost uygulaması, mikrobiyal faaliyetleri artırarak bitki su alımını desteklemiştir. Nötr topraklarda vermikompost ve AG gibi organik gübreler bitkinin su tutmasını ve mikrobiyal faaliyetleri destekleyerek mısırın yaş ağırlığını artırmıştır. Bazik topraklarda özellikle AG içerikli uygulamalar yaş ağırlık üzerine olumlu etkiler yapmıştır.

Çizelge 4.84. Farklı toprak reaksiyonları ve uygulamalarda mısır bitkisinin yaş ağırlık ortalamaları

| Yaş Ağırlık Ortalamaları (g) |             |             |              |
|------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Uygulamalar                  | Asit Toprak | Nötr Toprak | Bazik Toprak |
| Kontrol                      | 11.3        | 32.3        | 4.0          |
| TSP                          | 10.0        | 46.7        | 4.0          |
| HKF                          | 10.7        | 33.7        | 4.7          |
| TSP+Biochar                  | 49.3        | 58.0        | 14.0         |
| TSP+Vermikompost             | 72.7        | 70.7        | 9.7          |
| TSP+AG                       | 57.0        | 57.7        | 12.7         |
| HKF.+Biochar                 | 49.7        | 46.0        | 10.7         |
| HKF +Vermikompost            | 62.0        | 47.6        | 11.0         |
| HKF +AG                      | 51.0        | 50.3        | 14.0         |

Mısır bitkisinin kuru ağırlık ortalamaları incelendiğinde, asidik topraklarda en yüksek kuru ağırlık ortalamaları TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost uygulamalarında görülmüştür (Çizelge 4.85). Vermikompostun mikrobiyal aktiviteyi artırması ve kök bölgesinde besin elementi yarıyışlılığını teşvik etmesinden dolayı kuru ağırlık ortalamalarında artış sağladığı söylenebilir. Nötr topraklarda fosforlu gübrelerden TSP'nin tek başına ve organik gübrelerler birlikte uygulamalarının bitki kuru ağırlığını

artırdığı görülmüştür. Bazık topraklarda ise kuru ağırlıklık ortalamalarına vermikompost ve AG uygulamalarının daha etkin olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.85. Farklı toprak reaksiyonları ve uygulamalarda mısır bitkisinin kuru ağırlık ortalamaları

| Kuru Ağırlık Ortalamaları (g) |             |             |              |
|-------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Uygulamalar                   | Asit Toprak | Nötr Toprak | Bazık Toprak |
| Kontrol                       | 3.3         | 6.0         | 2.3          |
| TSP                           | 3.2         | 7.7         | 2.2          |
| HKF                           | 3.2         | 6.2         | 2.4          |
| TSP+Biochar                   | 7.6         | 8.5         | 3.2          |
| TSP+Vermikompost              | 9.9         | 10.1        | 3.0          |
| TSP+AG                        | 8.7         | 8.4         | 3.2          |
| HKF.+Biochar                  | 7.8         | 6.9         | 3.1          |
| HKF +Vermikompost             | 9.1         | 6.7         | 3.0          |
| HKF +AG                       | 8.2         | 7.2         | 3.5          |

#### 4.3.2. Mısır bitkisinin azot içeriği

Elde edilen bulgular, azot alımının yalnızca gübreleme programından değil, aynı zamanda toprak reaksiyonu ve organik ve inorganik uygulamaların yapısı tarafından etkilenmektedir. Mısır bitkisinin azot içeriği değerlerinde değişim katsayıları incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde bitkilerin değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.86).

Çarpıklık değeri (skewness) incelendiğinde asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde de yetişen mısır bitkilerinin K değerlerini normal dağılım gösterdiği saptanmıştır.

Basıklık değeri (kurtosis) incelendiğinde asidik topraklarda yalnızca HKF+Vermikompost grubunun normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen dağılım gösterdiği, kontrol, TSP, TSP+Vermikompost ve HKF+Biochar gruplarının ise normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Nötr topraklarda TSP + Vermikompost, HKF ve HKF+AG uygulamalarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen dağılım gösterdiği, Kontrol ve TSP+AG gruplarının normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir. Bazik topraklarda ise TSP+AG, HKF ve HKF+Biochar gruplarının normalden basık, yayvan ve verilerin heterojen dağılım gösterdiği, kontrol, TSP ve HKF+AG gruplarının normalden sivri ve verilerin homojen dağılım gösterdiği, diğer tüm uygulamaların ise normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Mısır bitkisinin N analiz sonuçları yapılan uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p<0.05$ ) (Çizelge 4.87). Asidik toprakta en yüksek azot içeriği %3.77 ile TSP+AG grubunda, en düşük içerik ise %3.45 ile kontrol grubunda tespit edilmiştir. Nötr toprakta en yüksek N içerikleri %3.82–3.78 aralığında TSP+AG, HKF+Vermikompost ve HKF+AG gruplarında, en düşük değer ise %3.47 ile HKF+Biochar grubunda ölçülmüştür. Bazik toprakta da en yüksek azot içeriği yine %3.84 ile TSP+AG uygulamasında belirlenmiş, bunu %3.80 ile HKF+AG grubu izlemiştir. Bu çalışmada elde edilen azot değerleri, azot sınır değerlerine göre incelendiğinde, kontrol, TSP+Biochar ve HKF+Biochar uygulamalarında azot içeriğinin yeterlilik sınırına çok yakın olduğu, diğer tüm uygulamalarda ise yetiştirilen mısır bitkilerinin azot içeriklerinin “yeterli” sınıfına girdiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.86. Mısır bitkisi % N analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | % N  |      |      |           |         |                   |                    |       |
|--------|------------------|------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|-------|
|        |                  | Min. | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |       |
| Asidik | Kontrol          | 3.4  | 3.6  | 3.45 | 0.071     | 0.005   | 2.06              | 1.53               | 2.35  |
|        | TSP              | 3.2  | 3.7  | 3.54 | 0.230     | 0.053   | 6.50              | -1.85              | 3.41  |
|        | TSP+Biochar      | 3.4  | 3.5  | 3.49 | 0.041     | 0.002   | 1.17              | -0.71              | 1.79  |
|        | TSP+Vermikompost | 3.7  | 3.8  | 3.72 | 0.031     | 0.001   | 0.83              | 1.60               | 2.70  |
|        | TSP+AG           | 3.7  | 3.8  | 3.77 | 0.038     | 0.001   | 1.01              | 0.36               | 0.26  |
|        | HKF              | 3.6  | 3.7  | 3.62 | 0.041     | 0.002   | 1.13              | 0.71               | 1.79  |
|        | HKF+Biochar      | 3.4  | 3.5  | 3.47 | 0.043     | 0.002   | 1.24              | 1.50               | 2.65  |
|        | HKF+Vermikompost | 3.5  | 3.7  | 3.60 | 0.061     | 0.004   | 1.69              | -0.07              | -5.35 |
|        | HKF+AG           | 3.6  | 3.7  | 3.65 | 0.041     | 0.002   | 1.12              | 0.00               | 0.39  |
| Nötr   | Kontrol          | 3.4  | 3.6  | 3.54 | 0.073     | 0.005   | 2.06              | -1.82              | 3.46  |
|        | TSP              | 3.6  | 3.7  | 3.64 | 0.026     | 0.001   | 0.71              | 0.86               | -0.29 |
|        | TSP+Biochar      | 3.5  | 3.6  | 3.55 | 0.029     | 0.001   | 0.82              | 0.86               | -1.29 |
|        | TSP+Vermikompost | 3.6  | 3.7  | 3.61 | 0.046     | 0.022   | 1.27              | -0.56              | -2.48 |
|        | TSP+AG           | 3.8  | 3.9  | 3.82 | 0.031     | 0.001   | 0.81              | 1.60               | 2.70  |
|        | HKF              | 3.6  | 3.8  | 3.70 | 0.54      | 0.003   | 14.59             | 0.24               | -4.34 |
|        | HKF+Biochar      | 3.4  | 3.5  | 3.47 | 0.017     | 0.000   | 0.49              | 0.73               | 0.34  |
|        | HKF+Vermikompost | 3.7  | 3.8  | 3.78 | 0.030     | 0.001   | 0.79              | -0.42              | -0.41 |
|        | HKF+AG           | 3.7  | 3.8  | 3.78 | 0.036     | 0.001   | 0.95              | -0.27              | -4.48 |
| Bazik  | Kontrol          | 3.4  | 3.4  | 3.42 | 0.012     | 0.000   | 0.35              | 1.13               | 2.23  |
|        | TSP              | 3.4  | 3.5  | 3.49 | 0.044     | 0.002   | 1.26              | -1.93              | 3.75  |
|        | TSP+Biochar      | 3.4  | 3.5  | 3.49 | 0.009     | 0.000   | 0.26              | 0.00               | 1.50  |
|        | TSP+Vermikompost | 3.7  | 3.8  | 3.75 | 0.026     | 0.001   | 0.69              | 0.86               | -0.29 |
|        | TSP+AG           | 3.8  | 3.9  | 3.84 | 0.061     | 0.004   | 1.59              | 0.27               | -3.50 |
|        | HKF              | 3.6  | 3.7  | 3.68 | 0.032     | 0.001   | 0.87              | 0.08               | -5.51 |
|        | HKF+Biochar      | 3.4  | 3.5  | 3.47 | 0.044     | 0.002   | 1.27              | 0.68               | -2.23 |
|        | HKF+Vermikompost | 3.6  | 3.7  | 3.68 | 0.024     | 0.001   | 0.65              | 1.19               | 0.44  |
|        | HKF+AG           | 3.7  | 3.8  | 3.80 | 0.017     | 0.000   | 0.45              | -1.54              | 2.89  |

Araştırmanın bulgularına göre, özellikle TSP+AG ve HKF+AG uygulamalarının tüm toprak reaksiyonlarında mısır bitkisinin azot alımını anlamlı düzeyde artırdığı saptanmıştır. Fosforun bitki gelişiminde azot ile pozitif bir etkileşim içinde olduğunu ve özellikle organik materyallerle birlikte uygulandığında bitki kök bölgesinde besin elementi yararlanılabilirliğinde artış sağladığını söylemek mümkündür (Rengel ve Damon, 2008). Organik gübreler, toprak mikrobiyal aktivitesini artırarak, N mineralizasyonunu hızlandırarak bitki alımına uygun hale getirmektedir (Chen ve ark., 2024). Vermikompost ve ahır gübresinin uzun vadeli uygulamaları, mikrobiyal biyokütle karbonunu ve enzimatik aktiviteyi (özellikle dehidrogenaz) artırmakta, bunun sonucunda azot ve fosfor gibi makro besin elementlerinin daha yüksek düzeyde bitkiler tarafından alımını sağlamaktadır. Asidik, nötr ve bazik topraklardaki farklı gübreleme uygulamaları sonucunda azot içeriği bakımından önemli varyasyonlar gözlenmiştir. Biochar uygulamaları, literatürde genel olarak toprak su tutma kapasitesini artırması, pH tamponlaması ve katyon değişim kapasitesini yükseltmesiyle bilinir (Lehmann et al., 2011). Ancak bu çalışmada elde edilen bulgular, biochar uygulamalarının N alımını tek başına artırmada yetersiz kalabildiğini, özellikle TSP ya da öğütülmüş fosfat kayası ile birlikte uygulandığında ise olumlu etkilerinin ortaya çıktığını göstermektedir.

Çizelge 4.87. Mısır bitkisinin N (%) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | % N       |         |        |
|------------------|-----------|---------|--------|
|                  | Asidik    | Nötr    | Bazik  |
| Kontrol          | 3.45 f    | 3.54 e  | 3.42 e |
| TSP              | 3.54 cdef | 3.64 c  | 3.49 d |
| TSP+Biochar      | 3.49 def  | 3.55 de | 3.49 d |
| TSP+Vermikompost | 3.72 ab   | 3.61 cd | 3.75 b |
| TSP+AG           | 3.77 a    | 3.82 a  | 3.84 a |
| HKF              | 3.62 bcd  | 3.70 b  | 3.68 c |
| HKF+Biochar      | 3.47 ef   | 3.47 f  | 3.47 d |
| HKF+Vermikompost | 3.60 bcde | 3.78 a  | 3.68 c |
| HKF+AG           | 3.65 abc  | 3.78 a  | 3.80 a |

Bu çalışma farklı fosfor ve organik materyal uygulamalarının farklı toprak türleriyle etkileşime girerek mısır bitkisinin azot alımını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Özellikle ahır gübresi ile desteklenmiş fosforlu gübre uygulamaları, tüm toprak reaksiyonlarında azot alımını arttırmada etkili olmuştur. Bu bulgular, sürdürülebilir gübreleme stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir temel sunmakta, hem

verim hem de besin elementi kullanımını açısından çevresel ve ekonomik srdrlebilirliēe katkı saēlamaktadır.



#### 4.3.3. Mısır bitkisinin fosfor içeriği

Çalışma yalnızca kullanılan gübre formunun değil, aynı zamanda toprağın kimyasal özelliklerinin de bitkinin fosfor alımı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını açıkça ortaya koymuştur.

Mısır bitkisinin fosfor içeriği değişim katsayıları incelendiğinde, asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde de yetişen bitkilerin değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.88). Çarpıklık değeri (skewness) asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde de yetişen mısır bitkilerinin P değerlerini normal dağılım gösterdiğini göstermektedir.

Saksı denemesinden elde edilen mısır bitkilerinin P analiz sonuçları Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p < 0.05$ ). Yapılan Duncan test sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.89'da verilmiştir. Asidik toprakta en yüksek P içeriği %0.31 ile HKF+Vermikompost uygulamasında, nötr toprakta %0.34 ile TSP+Vermikompost, bazik toprakta ise %0.42 ile HKF+Biochar uygulamalarında tespit edilmiştir. Her üç toprak reaksiyon grubunda da kontrol gruplarında en düşük P içerikleri gözlenmiştir.

P içeriği sınır değerlerine göre değerlendirildiğinde, asidik toprakta HKF+Vermikompost ve TSP+AG uygulamaları "yeterli" sınıfına girerken, diğer uygulamalar "az" olarak sınıflandırılmıştır. Nötr toprakta TSP, TSP+Biochar ve TSP+Vermikompost uygulamaları yeterli düzeye ulaşmıştır. Bazik toprakta, TSP+Biochar ve HKF+Biochar uygulamaları yeterli düzeyde P içeriği sağlamıştır.

Bu çalışmada özellikle TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost uygulamalarının mısır bitkisinin fosfor içeriğini üç farklı pH'da istatistiksel olarak anlamlı düzeyde artırdığı gözlemlenmiştir. Fosfor alımının yalnızca fosforun miktarı ile değil, aynı zamanda kök ortamındaki mikrobiyal aktivite ve organik asit üretimiyle de bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır. Organik gübrelerin P'nin mobilizasyonunu ve kök tarafından alınabilirliğini artırdığı bilinmektedir (Richardson ve ark., 2009). Ayrıca TSP+Biochar ve HKF+Biochar uygulamaları, özellikle bazik toprak koşullarında yüksek P içeriği ile öne çıkmıştır. Biochar fosforu doğrudan sağlamasa da, toprak pH'sını tamponlayıcı etkisi, yüzey alanı ve katyon değişim kapasitesinin yüksekliği sayesinde fosforun fiksasyonunu azaltma ve alımını artırma yönündeki dolaylı etkisiyle

Çizelge 4.88. Mısır bitkisi P analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | % P  |      |      |           |         |                   |                    |   |
|--------|------------------|------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|---|
|        |                  | Min. | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |   |
| Asidik | Kontrol          | 0.20 | 0.22 | 0.20 | 0.011     | 0.000   | 5.50              | 1.73               | - |
|        | TSP              | 0.20 | 0.23 | 0.21 | 0.015     | 0.000   | 7.14              | -0.94              | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.27 | 0.30 | 0.28 | 0.015     | 0.000   | 5.36              | -0.94              | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.29 | 0.32 | 0.30 | 0.017     | 0.000   | 5.67              | 1.73               | - |
|        | TSP+AG           | 0.24 | 0.26 | 0.25 | 0.011     | 0.000   | 4.40              | -1.73              | - |
|        | HKF              | 0.25 | 0.26 | 0.25 | 0.005     | 0.000   | 2.00              | 1.73               | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.27 | 0.28 | 0.27 | 0.005     | 0.000   | 1.85              | -1.73              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.30 | 0.32 | 0.31 | 0.011     | 0.000   | 3.55              | -1.73              | - |
|        | HKF+AG           | 0.22 | 0.24 | 0.23 | 0.010     | 0.000   | 4.35              | 0.00               | - |
| Nötr   | Kontrol          | 0.20 | 0.22 | 0.21 | 0.010     | 0.000   | 4.76              | 0.00               | - |
|        | TSP              | 0.30 | 0.31 | 0.30 | 0.005     | 0.000   | 1.67              | -1.73              | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.30 | 0.33 | 0.31 | 0.017     | 0.000   | 5.48              | 1.73               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.33 | 0.35 | 0.34 | 0.010     | 0.000   | 2.94              | 0.00               | - |
|        | TSP+AG           | 0.24 | 0.25 | 0.24 | 0.005     | 0.000   | 2.08              | -1.73              | - |
|        | HKF              | 0.22 | 0.23 | 0.22 | 0.005     | 0.000   | 2.27              | -1.73              | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.21 | 0.22 | 0.21 | 0.005     | 0.000   | 2.38              | -1.73              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.22 | 0.24 | 0.23 | 0.010     | 0.000   | 4.35              | 0.00               | - |
|        | HKF+AG           | 0.24 | 0.26 | 0.24 | 0.011     | 0.000   | 4.58              | 1.73               | - |
| Bazik  | Kontrol          | 0.18 | 0.22 | 0.19 | 0.020     | 0.000   | 10.53             | 1.29               | - |
|        | TSP              | 0.22 | 0.25 | 0.23 | 0.015     | 0.000   | 6.52              | -0.94              | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.38 | 0.40 | 0.38 | 0.011     | 0.000   | 2.89              | 1.73               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.23 | 0.29 | 0.26 | 0.032     | 0.001   | 12.31             | -1.55              | - |
|        | TSP+AG           | 0.23 | 0.25 | 0.24 | 0.010     | 0.000   | 4.17              | 0.00               | - |
|        | HKF              | 0.20 | 0.22 | 0.20 | 0.011     | 0.000   | 5.50              | 1.73               | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.41 | 0.45 | 0.42 | 0.020     | 0.000   | 4.76              | 1.29               | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.25 | 0.28 | 0.27 | 0.017     | 0.000   | 6.30              | -1.73              | - |
|        | HKF+AG           | 0.27 | 0.31 | 0.28 | 0.020     | 0.000   | 7.14              | 1.29               | - |

açıklanabilir (Lehmann ve Joseph, 2009; Glaser ve ark., 2002). Bilindiği üzere toprak pH'sı, fosforun çözünürlüğünü doğrudan etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Toprak reaksiyonunun nötrden uzaklaştığı durumlarda (özellikle <5.5 veya >7.5), fosforun Ca, Fe ve Al ile çözünmeyen bileşikler oluşturma eğilimi artar ve bu da bitkiler tarafından alınabilirliğini sınırlar (Hinsinger, 2001). Asidik topraklarda en yüksek P içeriği, HKF+Vermikompost uygulamasında (%0.31) görülürken, kontrol grubunda %0.20 ile sınır değerinin altında kalmıştır. Benzer şekilde, bazik toprakta en yüksek P içeriği HKF+Biochar (%0.42) uygulamasında elde edilmiştir. Bu veriler, toprağın pH'sının olumsuz etkilerini azaltmada biochar ve vermikompost gübresi gibi organik katkıların pozitif bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.89. Mısır bitkisinin P (%) analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | % P     |         |         |
|------------------|---------|---------|---------|
|                  | Asidik  | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 0.20 f  | 0.21 e  | 0.19 f  |
| TSP              | 0.21 ef | 0.30 b  | 0.23 de |
| TSP+Biochar      | 0.25 bc | 0.31 b  | 0.38 b  |
| TSP+Vermikompost | 0.28 ab | 0.34 a  | 0.26 cd |
| TSP+AG           | 0.30 b  | 0.24 c  | 0.24 de |
| HKF              | 0.25 d  | 0.22 de | 0.20 ef |
| HKF+Biochar      | 0.27 c  | 0.21 de | 0.42 a  |
| HKF+Vermikompost | 0.31 a  | 0.23 cd | 0.27 cd |
| HKF+AG           | 0.23 e  | 0.24 c  | 0.28 c  |

Fosfor alımının artırılmasında yalnızca kimyasal gübrelemenin değil, aynı zamanda toprak biyolojisi ve kimyası ile uyumlu organik materyallerin uygulanmasının da dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle vermikompost ve biochar gibi katkıların, öğütülmüş fosfat gibi düşük çözünürlüklü P kaynaklarının etkinliğini artırabileceğini göstermektedir. Biochar uygulamalarının, bazik toprak koşullarında P'yi geçici olarak tutarak alınabilirliğini artırma potansiyeline sahiptir. Ancak bu etkinin doza ve biochar özelliklerine göre değişebileceği dikkate alınmalıdır. Yapılan bu sera çalışması fosforlu gübreler ve organik materyallerin birlikte kullanımının etkinliği ile ilgili bir çok bilgi ve fikir sunmuş olsa da, tarla koşullarında uzun süreli uygulamalarla bu sonuçların doğrulanması, önerilerin üretici düzeyinde uygulanabilirliği açısından önemlidir.

#### 4.3.4. Mısır bitkisi potasyum içeriği

Mısır bitkisinin potasyum içeriği değişim katsayıları her üç toprak grubunda düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.90). Çarpıklık değeri (skewness) toprakların üçünde de yetişen mısır bitkilerinin K değerlerini normal dağılım gösterdiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, potasyumun toprakta oldukça hareketli olmasına rağmen, organik materyallerin K alımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Özellikle biochar ve vermikompostla fosforlu gübre uygulamaları, potasyumun bitki bünyesindeki birikimini artırmış ve potasyumun alım etkinliğinde dikkate değer artışlar sağlamıştır.

Asidik toprakta en yüksek K içeriği %5.51 ile TSP+Vermikompost uygulamasında, bunu sırasıyla TSP+AG (%5.45), HKF+Vermikompost (%5.45) ve HKF+AG (%5.41) grupları takip etmiştir (Çizelge 4.91). En düşük değer ise kontrol grubunda (%4.42) ölçülmüştür. Nötr toprakta en yüksek K içerikleri HKF+AG (%4.91), TSP+Vermikompost (%4.89) ve HKF+Vermikompost (%4.85) gruplarında, en düşük ise TSP (%3.15) ve kontrol (%3.57) gruplarında kaydedilmiştir. Bazı toprakta en yüksek değer %4.30 ile HKF+Vermikompost uygulamasına ait olup, en düşük değer yine kontrol grubunda (%3.51) gözlenmiştir. Potasyum içerikleri, asidik toprakta tüm uygulamalarda “yüksek”, nötr toprakta Kontrol, TSP, HKF ve HKF+Biochar gruplarında “yeterli”, diğer tüm gruplar ise “yüksek” olarak değerlendirilmiştir. Bazı toprakta TSP, HKF+Biochar ve HKF+Vermikompost uygulamalarında “yeterli” sınıfındayken, diğer uygulamalar “fazla” kategorisinde yer almıştır.

Bu çalışmada elde edilen verilere göre, tüm toprak reaksiyonlarında en yüksek K değerleri TSP+Vermikompost, HKF+Vermikompost ve HKF+AG uygulamalarında tespit edilmiştir. Bu durum, organik materyallerin yalnızca besin elementi kaynağı olarak değil, aynı zamanda besinlerin hareketini ve kök bölgesinde yarayışlılıklarını artırıcı etkilerini göstermektedir. Yapılan çalışmalar organik gübrelerin toprağın potasyum tutma kapasitesini artırdığı ve topraktaki değişebilir potasyumun bitki tarafından alımını kolaylaştırdığı belirtilmektedir (Leogrande ve ark, 2024; Diatta ve ark., 2020).

Çizelge 4.90. Mısır bitkisi K analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | % K  |      |      |           |         |                   |                    |          |
|--------|------------------|------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|----------|
|        |                  | Min. | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |          |
|        |                  |      |      |      |           |         |                   | Skewness           | Kurtosis |
| Asidik | Kontrol          | 4.22 | 4.75 | 4.42 | 0.287     | 0.083   | 6.49              | 1.62               | -        |
|        | TSP              | 4.38 | 4.95 | 4.67 | 0.285     | 0.082   | 6.10              | -0.37              | -        |
|        | TSP+Biochar      | 4.50 | 5.52 | 5.02 | 0.510     | 0.261   | 10.16             | -0.30              | -        |
|        | TSP+Vermikompost | 5.17 | 5.70 | 5.51 | 0.295     | 0.087   | 5.35              | -1.70              | -        |
|        | TSP+AG           | 5.34 | 5.67 | 5.45 | 0.187     | 0.035   | 3.43              | 1.73               | -        |
|        | HKF              | 4.48 | 5.04 | 4.74 | 0.280     | 0.079   | 5.91              | 0.42               | -        |
|        | HKF+Biochar      | 4.40 | 4.56 | 4.88 | 0.535     | 0.287   | 10.96             | 0.71               | -        |
|        | HKF+Vermikompost | 5.26 | 5.70 | 5.45 | 0.226     | 0.051   | 4.15              | 1.11               | -        |
|        | HKF+AG           | 5.16 | 5.54 | 5.41 | 0.216     | 0.047   | 3.99              | -1.73              | -        |
| Nötr   | Kontrol          | 3.23 | 3.78 | 3.57 | 0.299     | 0.090   | 8.38              | -1.63              | -        |
|        | TSP              | 3.04 | 3.23 | 3.15 | 0.100     | 0.010   | 3.17              | -1.43              | -        |
|        | TSP+Biochar      | 4.12 | 4.67 | 4.34 | 0.289     | 0.084   | 6.66              | 1.40               | -        |
|        | TSP+Vermikompost | 4.63 | 5.07 | 4.89 | 0.232     | 0.054   | 4.74              | -1.45              | -        |
|        | TSP+AG           | 4.28 | 4.76 | 4.53 | 0.241     | 0.058   | 5.32              | -0.49              | -        |
|        | HKF              | 3.59 | 3.79 | 3.67 | 0.102     | 0.011   | 2.78              | 1.09               | -        |
|        | HKF+Biochar      | 3.70 | 3.96 | 3.85 | 0.136     | 0.019   | 3.53              | -1.36              | -        |
|        | HKF+Vermikompost | 4.65 | 5.05 | 4.85 | 0.200     | 0.040   | 4.12              | -0.30              | -        |
|        | HKF+AG           | 4.55 | 5.28 | 4.91 | 0.365     | 0.133   | 7.43              | 0.12               | -        |
| Bazik  | Kontrol          | 3.23 | 3.74 | 3.51 | 0.259     | 0.067   | 7.38              | -0.94              | -        |
|        | TSP              | 4.17 | 4.21 | 4.19 | 0.020     | 0.000   | 0.48              | 0.00               | -        |
|        | TSP+Biochar      | 3.78 | 4.09 | 3.92 | 0.156     | 0.024   | 3.98              | 0.66               | -        |
|        | TSP+Vermikompost | 3.55 | 4.24 | 3.82 | 0.366     | 0.134   | 9.58              | 1.49               | -        |
|        | TSP+AG           | 3.78 | 4.05 | 3.89 | 0.138     | 0.019   | 3.55              | 1.11               | -        |
|        | HKF              | 3.86 | 4.06 | 3.95 | 0.100     | 0.010   | 2.53              | 0.30               | -        |
|        | HKF+Biochar      | 3.82 | 4.27 | 4.00 | 0.236     | 0.056   | 5.90              | 1.39               | -        |
|        | HKF+Vermikompost | 3.81 | 4.57 | 4.30 | 0.427     | 0.183   | 9.93              | -1.72              | -        |
|        | HKF+AG           | 3.76 | 4.12 | 3.89 | 0.195     | 0.038   | 5.01              | 1.61               | -        |

Vermikompost içerdiği humik maddeler ve enzimatik aktiviteyi artırıcı bileşenleriyle, kök çevresindeki mikrobiyal faaliyetleri ve dolayısıyla potasyumun çözünürlüğünü de arttırdığı bilinmektedir (Edwards ve ark., 2007). Çalışmanın verileri de bu literatür bilgisiyle uyumlu olup vermikompost uygulaması, potasyum alımını düzenli olarak desteklemiştir. Biocharın kullanıldığı uygulamalarda, özellikle asidik ve bazik topraklarda K düzeyleri dikkat çekmektedir. HKF+Biochar ve TSP+Biochar uygulamaları bazik topraklarda potasyum düzeyini “yeterli” ve “yüksek” seviyelere çıkardığı görülmüştür. Bu durumun, biocharın pH tamponlama kapasitesi, katyon değişim kapasitesini artırmadaki etkisi ve gözenekli yapısı gibi özelliklerinin kök bölgesinde potasyum salınımını arttırdığı şeklinde düşünülmektedir (Glaser ve ark., 2002; Lehmann ve Joseph, 2009). Ayrıca biocharın organik karbon yapısının mikrobiyal faaliyeti destekleyerek potasyumun mineralizasyonunu ve mobilizasyonunu hızlandığı da bilinmektedir. Bu bilgilerin ışığında elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, bazik toprak koşullarında bile potasyumun alınabilirliğinin biochar uygulamalarıyla artması, bu materyalin toprak düzenleyici etkisinin yalnızca fiziksel değil, kimyasal yönde önemli olduğunu göstermektedir. Bilindiği üzere toprak pH’sı, potasyum gibi alkali metallerin çözünürlüğünde doğrudan etkili olmasa da, potasyumun diğer katyonlarla olan rekabeti açısından oldukça önemlidir. Özellikle kalsiyum, magnezyum ve sodyum ile rekabet potasyumun kökler tarafından alımını sınırlayabilir (Marschner, 2012). Ancak çalışmada kullanılan organik materyaller sayesinde bu rekabetin etkisinin azaldığı ve bitkilerin yeterli hatta yüksek düzeyde K absorbe edebildiği görülmektedir.

Çizelge 4.91. Mısır bitkisinin K analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | % K     |         |          |
|------------------|---------|---------|----------|
|                  | Asidik  | Nötr    | Bazik    |
| Kontrol          | 4.42 b  | 3.57 c  | 3.51 c   |
| TSP              | 4.67 b  | 3.15 d  | 4.19 ab  |
| TSP+Biochar      | 5.02 ab | 4.34 b  | 3.92 abc |
| TSP+Vermikompost | 5.51 a  | 4.89 a  | 3.82 bc  |
| TSP+AG           | 5.45 a  | 4.53 ab | 3.89 abc |
| HKF              | 4.74 b  | 3.67 c  | 3.95 abc |
| HKF+Biochar      | 4.88 ab | 3.85 c  | 4.00 ab  |
| HKF+Vermikompost | 5.45 a  | 4.85 a  | 4.30 a   |
| HKF+AG           | 5.41 a  | 4.91 a  | 3.89 abc |

Potasyum gibi mobil bir elementin bile, uygulanan fosforlu gübre formu ve kullanılan organik materyallerin doğasına bağlı olarak bitki bünyesine alınmasında farklılıklar olabileceğini açıkça göstermektedir. Özellikle biochar ve vermikompost ile birlikte kullanılan fosforlu gübre kaynakları, K alımını artırmaktadır.



#### 4.3.5. Mısır bitkisi kalsiyum içeriği

Mısır bitkisinin kalsiyum içeriği değerlerinde değişim katsayıları incelendiğinde her üç toprak grubunda değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.92).

Benzer şekilde çarpıklık değeri (skewness) mısır bitkisinin tamamında Ca değerlerinin normal dağılım gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Asidik toprakta en yüksek Ca içeriği TSP (%0.58) ve HKF(%0.57) uygulamalarında ölçülürken, en düşük değer %0.39 ile TSP+AG grubunda saptanmıştır (Çizelge 4.93). Nötr toprakta en yüksek Ca değeri %0.70 ile TSP+Vermikompost, %0.64 ile HKF+Vermikompost uygulamalarında elde edilmiştir. Bazık toprakta en yüksek Ca içeriği %0.94 ile yine TSP+Vermikompost uygulamasında kaydedilmiş, en düşük değer ise %0.45 ile TSP+AG uygulamasında tespit edilmiştir. Asidik ve nötr topraklardaki tüm uygulamalarda Ca bitki için yeterli seviyededir. Ancak bazık toprakta TSP+Vermikompost uygulaması "fazla" sınıfında yer alırken, diğer tüm uygulamalar "yeterli" olarak değerlendirilmiştir.

Araştırma sonuçlarına göre, özellikle TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost uygulamaları nötr ve bazık toprak koşullarında en yüksek Ca değerlerini sahip olmuştur. Özellikle bazık toprakta TSP+Vermikompost uygulaması %0.94'lük kalsiyum içeriği ile sınır değerlerin üzerinde bir düzeye ulaşmıştır. Organik materyallerin özellikle kalsiyum gibi ikincil makro elementlerin hareketini ve kök bölgesinde alınabilirliğini artırmada etkin rol oynadığını göstermektedir (Edwards ve ark., 2007). Vermikompost toprak mikrobiyal aktivitesini artırarak besin elementlerinin mineralizasyonunu hızlandırmakta ve bu sayede kalsiyumun kök bölgesine taşınmasını kolaylaştırmaktadır (Aira ve ark., 2002; Aria ve ark., 2007). Ayrıca vermikompostların ürettiği enzimler ve mikrobiyal metabolitlerin, toprakta komplekslenmiş veya karbonat formundaki Ca'nın çözünmesini desteklediği bilinmektedir (Lazcano ve ark., 2008). Bunun yanı sıra, TSP+AG uygulamasının çoğu pH seviyesinde düşük Ca düzeyleri ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, ahır gübresinde bulunan yüksek miktardaki organik asitlerin Ca ile kompleksleşerek alımını sınırlandırması ya da antagonistik iyon etkileşimleri (örneğin K-Ca antagonizmi) nedeniyle kalsiyumun alımının engellenmesi

Çizelge 4.92. Mısır bitkisi Ca analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | % Ca |      |      |           |         |                   |                    |   |
|--------|------------------|------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|---|
|        |                  | Min. | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |   |
| Asidik | Kontrol          | 0.48 | 0.50 | 0.49 | 0.011     | 0.000   | 2.24              | -1.73              | - |
|        | TSP              | 0.56 | 0.62 | 0.58 | 0.030     | 0.001   | 5.17              | 0.94               | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.40 | 0.42 | 0.41 | 0.011     | 0.000   | 2.68              | -1.73              | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.41 | 0.46 | 0.43 | 0.025     | 0.001   | 5.81              | -0.59              | - |
|        | TSP+AG           | 0.38 | 0.40 | 0.39 | 0.010     | 0.000   | 2.56              | 0.00               | - |
|        | HKF              | 0.57 | 0.58 | 0.57 | 0.005     | 0.000   | 0.88              | -1.73              | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.45 | 0.50 | 0.47 | 0.025     | 0.001   | 5.32              | -0.59              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.44 | 0.48 | 0.46 | 0.023     | 0.001   | 5.00              | -1.73              | - |
|        | HKF+AG           | 0.48 | 0.51 | 0.49 | 0.017     | 0.000   | 3.47              | 1.73               | - |
| Nötr   | Kontrol          | 0.53 | 0.59 | 0.56 | 0.032     | 0.001   | 5.71              | -1.55              | - |
|        | TSP              | 0.49 | 0.51 | 0.50 | 0.010     | 0.000   | 2.00              | 0.00               | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.48 | 0.60 | 0.54 | 0.060     | 0.004   | 11.11             | -0.50              | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.67 | 0.76 | 0.70 | 0.047     | 0.002   | 6.71              | 1.39               | - |
|        | TSP+AG           | 0.49 | 0.56 | 0.52 | 0.036     | 0.001   | 6.92              | 1.15               | - |
|        | HKF              | 0.52 | 0.59 | 0.55 | 0.036     | 0.001   | 6.55              | 1.15               | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.49 | 0.56 | 0.52 | 0.036     | 0.001   | 6.92              | 1.15               | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.60 | 0.67 | 0.64 | 0.037     | 0.001   | 5.78              | -1.60              | - |
|        | HKF+AG           | 0.47 | 0.52 | 0.50 | 0.026     | 0.001   | 5.20              | -1.46              | - |
| Bazik  | Kontrol          | 0.48 | 0.53 | 0.50 | 0.025     | 0.001   | 5.00              | 0.59               | - |
|        | TSP              | 0.54 | 0.61 | 0.57 | 0.035     | 0.001   | 6.14              | 0.42               | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.59 | 0.64 | 0.60 | 0.028     | 0.001   | 4.67              | 1.73               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.89 | 0.98 | 0.94 | 0.049     | 0.002   | 5.21              | -1.65              | - |
|        | TSP+AG           | 0.42 | 0.48 | 0.45 | 0.032     | 0.001   | 7.11              | -1.55              | - |
|        | HKF              | 0.42 | 0.55 | 0.49 | 0.065     | 0.004   | 13.27             | -0.67              | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.55 | 0.59 | 0.57 | 0.020     | 0.000   | 3.51              | -1.29              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.63 | 0.78 | 0.68 | 0.083     | 0.007   | 12.21             | 1.70               | - |
|        | HKF+AG           | 0.56 | 0.63 | 0.58 | 0.040     | 0.002   | 6.90              | 1.73               | - |

ile açıklanabilir (Mengel ve Kirkby, 2001). Toprak pH'sı, özellikle Ca gibi alkali toprak elementlerinin çözünürlüğü ve bitki tarafından alınımı üzerine önemli bir etkiye sahiptir.  $\text{CaCO}_3$  formundaki kalsiyum, özellikle bazik pH koşullarında çözünürlüğü düşük bir bileşik olup, bu formun bitkiye yarıyışlılığı sınırlıdır (Marschner, 2012). Ancak çalışmada, özellikle TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost gibi organik materyallerle desteklenen uygulamaların Ca alımını bazik toprakta dahi artırabildiği görülmüştür. Elde edilen bu bulgu, söz konusu organik materyallerin karbonatların çözünmesini kolaylaştırarak kalsiyumun bitki tarafından alınımını artırıcı etki yapabileceğini göstermektedir. Nitekim bazı çalışmalar, organik asitlerin ve mikrobiyal solunumun toprağın mikro çevresinde pH'yı düşürerek karbonat çözünürlüğünü artırdığını ve dolayısıyla kalsiyumun alınabilirliğini artırdığını ortaya koymuştur (Zhang ve ark., 2016). Ayrıca biochar uygulamalarının da toprağın katyon değişim kapasitesini artırarak Ca gibi bazı katyonların tutulmasını artırabileceği gösterilmiştir.

Çizelge 4.93. Mısır bitkisinin Ca analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | % Ca    |        |          |
|------------------|---------|--------|----------|
|                  | Asidik  | Nötr   | Bazik    |
| Kontrol          | 0.49 b  | 0.56 b | 0.50 def |
| TSP              | 0.58 a  | 0.50 b | 0.57 cde |
| TSP+Biochar      | 0.41 de | 0.54 b | 0.60 bc  |
| TSP+Vermikompost | 0.43 cd | 0.70 a | 0.94 a   |
| TSP+AG           | 0.39 e  | 0.52 b | 0.45 f   |
| HKF              | 0.57 a  | 0.55 b | 0.49 ef  |
| HKF+Biochar      | 0.47 b  | 0.52 b | 0.57 cde |
| HKF+Vermikompost | 0.46 bc | 0.64 a | 0.68 b   |
| HKF+AG           | 0.49 b  | 0.50 b | 0.58 cd  |

Kalsiyum gibi elementlerin bitki bünyesine alımının yalnızca toprakta mevcut miktarına bağlı değil, aynı zamanda bu elementin hareketini etkileyen organik materyallerin varlığına ve toprak kimyasına bağlıdır. Özellikle vermikompostla birlikte fosforlu gübre uygulamaları, toprak pH'sından bağımsız olarak Ca alımını artırıcı potansiyele sahiptir.

#### 4.3.6. Mısır bitkisi magnezyum içeriği

Mısır bitkisinin magnezyum içeriği değişim katsayıları incelendiğinde, asidik ve nötr topraklarda yetişen bitkilerin değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bazik topraklardaki değişim katsayıları Kontrol, TSP+AG, HKFve HKF+AG uygulamaları orta derece değişkenlik gösterirken diğer grupların düşük derece değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.94). Çarpıklık değeri (skewness) bakıldığında toprakların üçünde de yetişen mısır bitkilerinin Mg değerlerinin normal dağılım gösterdiği saptanmıştır.

Çalışma elde edilen veriler magnezyumun yalnızca toprakta mevcut miktarıyla değil, aynı zamanda uygulanan gübre türü ve toprak özellikleriyle birlikte organik materyalin varlığına bağlı olarak bitki tarafından alınabilirliğinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

Saksı denemesindeki mısır bitkilerinin Mg analiz sonuçları Duncan testi ile karşılaştırılmış ve elde edilen veriler ise Çizelge 4.95’de verilmiştir ( $p<0,05$ ).

Asidik toprakta en yüksek Mg içeriği %0.21 ile TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost gruplarında, en düşük içerik ise %0.18 ile Kontrol grubunda ölçülmüştür. Nötr toprakta TSP uygulaması %0.35 ile en yüksek Mg içeriğini sahip olurken, TSP+AG uygulaması en düşük değere (%0.27) sahip olmuştur. Bazik toprakta ise en yüksek %0.64 ile TSP+Vermikompost, en düşük %0.46 ile HKF grubunda ölçülmüştür. Genel sınıflandırmaya göre, asidik ve nötr toprakta yetiştirilen bitkilerin tümü “yeterli” Mg içeriğine sahiptir. Ancak bazik toprakta yetiştirilen tüm uygulama gruplarının Mg içerikleri "fazla" kategorisine girmektedir (Çizelge 4.83). Özellikle bazik toprak koşullarında, magnezyum düzeylerinin sınırların üzerinde olduğu ve bunun, fazla alım ile sonuçlandığını göstermektedir (Jones ve ark., 1991).

Çalışma özellikle TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost uygulamalarının hem asidik hem de bazik toprak koşullarında Mg içeriğini anlamlı düzeyde artırdığını ortaya koymuştur. Vermikompost gübresinin, toprağın mikrobiyal aktivitesini artırarak mineralizasyon süreçlerini hızlandırdığı, bu sayede bu makro elementin kök bölgesinde bitki tarafından alınabilir hale geldiği belirtilmektedir (Aira ve ark., 2002; Lazcano ve ark., 2008). Bazik topraklarda, Mg içeriğinin tüm uygulamalarda "yüksek" sınıfında değerlendirilmesi, bu toprakların yapısında bulunan  $MgCO_3$ ’in çözünürlüğüne işaret

Çizelge 4.94. Mısır bitkisi Mg analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | % Mg |      |      |           |         |                   |                    |   |
|--------|------------------|------|------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|---|
|        |                  | Min. | Max. | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |   |
| Asidik | Kontrol          | 0.17 | 0.19 | 0.18 | 0.010     | 0.000   | 5.56              | 0.00               | - |
|        | TSP              | 0.17 | 0.19 | 0.18 | 0.011     | 0.000   | 6.11              | -1.73              | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.17 | 0.22 | 0.19 | 0.026     | 0.001   | 13.68             | 1.46               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.20 | 0.23 | 0.21 | 0.015     | 0.000   | 7.14              | -0.94              | - |
|        | TSP+AG           | 0.17 | 0.21 | 0.19 | 0.020     | 0.000   | 10.53             | 0.00               | - |
|        | HKF              | 0.18 | 0.19 | 0.18 | 0.005     | 0.000   | 2.78              | 1.73               | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.18 | 0.20 | 0.19 | 0.010     | 0.000   | 5.26              | 0.00               | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.20 | 0.24 | 0.21 | 0.020     | 0.000   | 9.52              | 1.29               | - |
|        | HKF+AG           | 0.18 | 0.24 | 0.20 | 0.030     | 0.001   | 15.00             | 0.94               | - |
| Nötr   | Kontrol          | 0.28 | 0.30 | 0.28 | 0.011     | 0.000   | 3.93              | 1.73               | - |
|        | TSP              | 0.34 | 0.38 | 0.35 | 0.020     | 0.000   | 5.71              | 1.30               | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.30 | 0.35 | 0.31 | 0.028     | 0.001   | 9.03              | 1.73               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.28 | 0.31 | 0.29 | 0.015     | 0.000   | 5.17              | 0.94               | - |
|        | TSP+AG           | 0.25 | 0.32 | 0.27 | 0.037     | 0.001   | 13.70             | 1.60               | - |
|        | HKF              | 0.29 | 0.31 | 0.29 | 0.015     | 0.000   | 5.17              | 0.94               | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.28 | 0.29 | 0.28 | 0.005     | 0.000   | 1.79              | -1.73              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.28 | 0.29 | 0.28 | 0.005     | 0.000   | 1.79              | -1.73              | - |
|        | HKF+AG           | 0.28 | 0.31 | 0.29 | 0.015     | 0.000   | 5.17              | 0.94               | - |
| Bazik  | Kontrol          | 0.41 | 0.59 | 0.52 | 0.101     | 0.010   | 19.42             | -1.71              | - |
|        | TSP              | 0.57 | 0.62 | 0.59 | 0.026     | 0.001   | 4.41              | 1.46               | - |
|        | TSP+Biochar      | 0.43 | 0.55 | 0.50 | 0.066     | 0.004   | 13.20             | -1.69              | - |
|        | TSP+Vermikompost | 0.64 | 0.66 | 0.64 | 0.011     | 0.000   | 1.72              | 1.73               | - |
|        | TSP+AG           | 0.51 | 0.70 | 0.62 | 0.098     | 0.010   | 15.81             | -1.24              | - |
|        | HKF              | 0.36 | 0.58 | 0.46 | 0.110     | 0.012   | 23.91             | 0.54               | - |
|        | HKF+Biochar      | 0.55 | 0.65 | 0.61 | 0.055     | 0.003   | 9.02              | -1.67              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 0.44 | 0.57 | 0.51 | 0.066     | 0.004   | 12.94             | -1.06              | - |
|        | HKF+AG           | 0.44 | 0.58 | 0.48 | 0.080     | 0.007   | 16.67             | 1.73               | - |

etmektedir.  $MgCO_3$ 'un çözünürlüğü,  $CaCO_3$ 'a göre daha yüksek olup bu durum Mg'un alımını artırmıştır. Ayrıca, nötr toprakta TSP+AG gibi bazı uygulamalarda Mg içeriğinin nispeten düşük olması, Ca ve K gibi katyonlarla olan antagonistik etkileşimler açıklanabilir. Magnezyum ile potasyum arasındaki antagonizm, özellikle yüksek K içeriği altında Mg'un alımını engelleyici yönde etki edebilmektedir (Mengel ve Kirkby, 2001). Biochar uygulamaları, toprak yapısını iyileştirme ve katyon değişim kapasitesini artırma potansiyeline sahip olup, bu etkiler sayesinde Mg'un adsorpsiyonunu ve kök bölgesindeki mevcudiyetini destekleyebilir. Ancak bu çalışmada, biochar uygulamaları Mg içeriğinde anlamlı artışlar sağlamıştır. Bu durumun, biocharın Mg'un toprakta tutulmasını etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Lehmann ve Joseph, 2009).

Çizelge 4.95. Mısır bitkisinin Mg analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | % Mg    |         |          |
|------------------|---------|---------|----------|
|                  | Asidik  | Nötr    | Bazık    |
| Kontrol          | 0.18 b  | 0.28 bc | 0.52 abc |
| TSP              | 0.18 ab | 0.35 a  | 0.59 abc |
| TSP+Biochar      | 0.19 ab | 0.31 b  | 0.50 abc |
| TSP+Vermikompost | 0.21 a  | 0.29 bc | 0.64 a   |
| TSP+AG           | 0.19 ab | 0.27 c  | 0.62 ab  |
| HKF              | 0.18 ab | 0.29 bc | 0.46 c   |
| HKF+Biochar      | 0.19 ab | 0.28 bc | 0.61 ab  |
| HKF+Vermikompost | 0.21 a  | 0.28 bc | 0.51 abc |
| HKF+AG           | 0.20 ab | 0.29 bc | 0.48 bc  |

Vermikompost gibi organik materyallerle birlikte uygulanmış fosforlu gübreler, mısır bitkisinin Mg alımını artırmada etkili olmuş ve bu etki tüm toprak pH düzeylerinde gözlemlenmiştir. Bu durum, organik materyallerin yalnızca besin kaynağı olmadığını, aynı zamanda besin elementlerinin alınabilirliğini etkilediğinin de göstermektedir.

#### 4.3.7. Mısır bitkisi demir içeriği

Mısır bitkisinin demir içeriği değişim katsayıları her üç toprak grubunda t düşük değişkenlik göstermektedir (Çizelge 4.96). Çarpıklık değeri (skewness) incelendiğinde asidik, nötr ve bazik topraklarda yetişen mısır bitkilerin tamamının Fe değerlerinin normal dağılım gösterdiği saptanmıştır.

Asidik toprakta en yüksek Fe içeriği TSP+Vermikompost (85.52 mg/kg), en düşük değer ise TSP+AG (60.44 mg/kg) uygulamasında saptanmıştır (Çizelge 4.97). Nötr toprakta tüm uygulamalar istatistiksel olarak aynı grupta yer almış, önemli bir fark gözlenmemiştir. Bazik toprakta ise en yüksek Fe içeriği TSP (153.27 mg/kg), en düşük içerik ise TSP+AG (69.09 mg/kg) uygulamasında tespit edilmiştir. Üç farklı pH grubundaki tüm uygulamalarda mısır bitkisinin Fe içeriği “yeterli” sınır değerleri (50–250 mg/kg) aralığında yer almıştır.

Bazik toprakta TSP uygulaması mısırdaki en yüksek Fe düzeyini (153.27 mg/kg) sağladığı görülürken, HKF ve bunun Biochar ile kombinasyonu gibi gruplarda en düşük Fe içerikleri tespit edilmiştir. Bu durum, çözünürlük açısından TSP gibi ticari fosforlu gübrelerin demir mobilizasyonunu teşvik edici etkisi olarak düşünülmektedir. Çünkü TSP, toprak çözeltisinde mikro düzeyde asidik bölgeler oluşturarak demirin çözünürlüğünü artırabilmektedir (Hinsinger ve ark., 2003). Ancak asidik toprakta Fe içeriği açısından en yüksek değer TSP+Vermikompost grubunda (85.52 mg/kg), en düşük değer ise TSP+AG grubunda gözlenmiştir. Vermikompost uygulaması mikrobiyal aktiviteyi ve organik asit salınımını artırarak Fe'nin çözünürlüğünü ve bitkiler tarafından alımını artırmaktadır (Edwards ve ark., 2007). Bu etkinin biochar kullanılan bazı uygulamalarda da söz konusu olduğu gözlemlenmiş, TSP+Biochar ve HKF+Biochar uygulamaları Fe içeriğini anlamlı düzeyde artırmıştır. Bu durumun, biocharın toprak pH'sını tamponlayıcı etkisinden kaynaklandığı ve katyon değişim kapasitesini artırıcı özelliği ile ilişkili olduğunu söylemek mümkündür (Glaser ve ark., 2002). Bu çalışmada bazik toprakta özellikle TSP uygulaması yüksek Fe alımı ile öne çıkmıştır. Bunun nedeninin, TSP'nin bölgesel olarak asitleştirici etkisiyle Fe çözünürlüğünü artırmasıyla mümkün olduğu düşünülmektedir. Nitekim Bertrand ve ark. (2006), MAP ve DAP gibi gübrelerin de benzer şekilde Fe mobilitesine etki ettiğini rapor etmiştir.

Çizelge 4.96. Mısır bitkisi Fe analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Fe (mg/kg) |        |        |           |         |                   |                    |   |
|--------|------------------|------------|--------|--------|-----------|---------|-------------------|--------------------|---|
|        |                  | Min.       | Max.   | Ort.   | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |   |
| Asidik | Kontrol          | 63.24      | 68.18  | 66.34  | 2.701     | 7.304   | 4.07              | -1.65              | - |
|        | TSP              | 65.73      | 67.44  | 66.64  | 0.860     | 0.741   | 1.29              | -0.60              | - |
|        | TSP+Biochar      | 73.32      | 88.59  | 79.51  | 8.032     | 64.528  | 10.10             | 1.41               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 83.09      | 88.81  | 85.52  | 2.954     | 8.726   | 3.45              | 1.91               | - |
|        | TSP+AG           | 58.55      | 62.71  | 60.44  | 2.106     | 4.435   | 3.48              | 0.79               | - |
|        | HKF              | 69.44      | 76.09  | 73.74  | 3.727     | 13.888  | 5.05              | -1.71              | - |
|        | HKF+Biochar      | 69.82      | 77.58  | 72.91  | 4.116     | 16.943  | 5.65              | 1.48               | - |
|        | HKF+Vermikompost | 67.39      | 79.56  | 73.60  | 6.089     | 37.074  | 8.27              | -0.18              | - |
|        | HKF+AG           | 60.62      | 63.88  | 62.25  | 1.630     | 2.657   | 2.62              | 0.02               | - |
| Nötr   | Kontrol          | 67.65      | 70.27  | 68.84  | 1.325     | 1.757   | 1.92              | 0.77               | - |
|        | TSP              | 61.46      | 71.48  | 67.03  | 5.104     | 26.052  | 7.61              | -0.95              | - |
|        | TSP+Biochar      | 60.11      | 81.14  | 70.52  | 10.517    | 110.600 | 14.91             | 0.09               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 61.87      | 72.92  | 67.20  | 5.535     | 30.636  | 8.24              | 0.31               | - |
|        | TSP+AG           | 63.99      | 74.55  | 68.17  | 5.615     | 31.530  | 8.24              | 1.50               | - |
|        | HKF              | 58.74      | 72.74  | 66.91  | 7.286     | 53.083  | 10.89             | -1.29              | - |
|        | HKF+Biochar      | 60.79      | 72.99  | 67.89  | 6.340     | 40.190  | 9.34              | -1.28              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 68.41      | 71.29  | 69.59  | 1.511     | 2.282   | 2.17              | 1.38               | - |
|        | HKF+AG           | 64.47      | 68.05  | 66.34  | 1.795     | 3.223   | 2.71              | -0.40              | - |
| Bazik  | Kontrol          | 71.46      | 82.25  | 75.17  | 6.131     | 37.590  | 8.16              | 1.73               | - |
|        | TSP              | 148.06     | 161.08 | 153.27 | 6.888     | 47.450  | 4.49              | 1.46               | - |
|        | TSP+Biochar      | 103.26     | 106.16 | 104.51 | 1.489     | 2.219   | 1.42              | 1.11               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 101.34     | 112.25 | 106.13 | 5.576     | 31.097  | 5.25              | 1.02               | - |
|        | TSP+AG           | 67.81      | 69.78  | 69.09  | 1.112     | 1.237   | 1.61              | -1.72              | - |
|        | HKF              | 76.26      | 89.22  | 83.74  | 6.709     | 45.010  | 8.01              | -1.23              | - |
|        | HKF+Biochar      | 76.62      | 81.08  | 79.29  | 2.357     | 5.554   | 2.97              | -1.45              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 74.02      | 83.28  | 78.53  | 4.634     | 21.478  | 5.90              | 0.23               | - |
|        | HKF+AG           | 72.37      | 86.69  | 77.89  | 7.701     | 59.302  | 9.89              | 1.57               | - |

Diğer yandan, vermikompost uygulamaları her üç toprak pH düzeyinde de Fe alımını artırıcı etki göstermiştir. Toprak pH'sından bağımsız olarak vermikompost organik asit ve mikrobiyal aktiviteyi arttırarak demir çözünürlüğünü artırabileceği işaret edilmektedir (Lazcano ve ark., 2008). Bu bulgu, özellikle bazik topraklarda demir yetersizliği görülen durumlarda vermikompost gübresinin etkili bir biyolojik iyileştirici olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

TSP+AG uygulaması hem asidik hem de bazik topraklarda en düşük Fe içeriğine sahip olmuştur. Ahır gübresinin içerdiği yüksek düzeyde Ca ve Mg gibi iki değerlikli katyonların demirle rekabete girmesiyle açıklanabilir. Ayrıca ahır gübresindeki çözünmemiş organik bileşiklerin Fe'yi kompleksleyerek alınabilirliğini azaltabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır (Mengel ve Kirkby, 2001).

Çizelge 4.97. Mısır bitkisinin Fe analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | Fe (mg/kg) |         |          |
|------------------|------------|---------|----------|
|                  | Asidik     | Nötr    | Bazik    |
| Kontrol          | 66.34 cd   | 68.84 a | 75.17 cd |
| TSP              | 66.64 cd   | 67.03 a | 153.27 a |
| TSP+Biochar      | 79.51 ab   | 70.52 a | 104.51 b |
| TSP+Vermikompost | 85.52 a    | 67.20 a | 106.13 b |
| TSP+AG           | 60.44 d    | 68.17 a | 69.09 d  |
| HKF              | 73.74 bc   | 66.91 a | 83.74 c  |
| HKF+Biochar      | 72.91 bc   | 67.89 a | 79.29 c  |
| HKF+Vermikompost | 73.60 bc   | 69.59 a | 78.53 cd |
| HKF+AG           | 62.25 d    | 66.34 a | 77.89 cd |

Bu çalışmada elde edilen veriler, demirin mısır bitkisi tarafından alımında kullanılan fosforun kaynağının, formunun ve uygulanan organik materyallerin özelliklerinin belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle vermikompost destekli fosforlu gübre uygulamaları, tüm pH seviyelerinde Fe alımını desteklemiştir. TSP uygulamaları ise, yüksek çözünürlüğü sayesinde bazik topraklarda bile Fe alımına etkili olmuştur.

#### 4.3.8. Mısır bitkisi çinko içeriği

Mısır bitkisinin çinko içeriği değerleri değişim katsayısının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.98). Çarpıklık değeri (skewness) üç toprak grubunda yetişen mısır bitkisinin Zn değerlerinin normal dağılım gösterdiği saptanmıştır.

Asidik toprakta en yüksek Zn içeriği 61.60 mg/kg ile HKF+Vermikompost uygulamasında, en düşük içerik 43.09 mg/kg ile TSP+Biochar grubunda gözlenmiştir (Çizelge 4.99). Nötr toprakta en yüksek değer 47.52 mg/kg ile HKF grubunda, en düşük ise 14.94 mg/kg ile TSP+Biochar uygulamasında ölçülmüştür. Bazık toprakta en yüksek Zn içeriği HKF+Vermikompost (19.27 mg/kg) ve HKF+AG (19.97 mg/kg) uygulamalarında kaydedilirken, en düşük içerik kontrol ve TSP+Biochar gruplarında (9.46–9.84 mg/kg) tespit edilmiştir. Zn içeriği sınıflandırmasına göre, asidik ve nötr topraklarda Zn içeriği çoğu uygulamada "yeterli", bazı uygulamalarda "fazla" sınırında yer alırken; bazık toprakta tüm uygulamalarda "az" sınırında yer aldığı belirlenmiştir.

Toprak pH'sı, Zn gibi mikro besin elementlerinin çözünürlüğü ve kök bölgesindeki hareketliliği üzerinde belirleyici bir faktördür. Çinko, özellikle yüksek pH koşullarında çözünürlüğü düşen bir elementtir ve kalsiyum karbonat varlığında  $ZnCO_3$  gibi çözünmeyen bileşikler oluşturarak alınabilirliğini sınırlar (Alloway, 2008; Marschner, 2012). Bazık toprakta çinko içerikleri tüm uygulamalarda sınır değerlerin altında kalmıştır ve özellikle TSP+Biochar uygulaması en düşük değerle (9.46 mg/kg) öne çıkmıştır. Buna karşın, asidik toprak koşullarında Zn alımı anlamlı derecede artmış ve en yüksek değer HKF+Vermikompost grubunda (61.60 mg/kg) gözlenmiştir. Bu sonuç, düşük pH koşullarında Zn çözünürlüğünün artmasıyla açıklanabilir. Ayrıca bu koşullarda vermikompost gübresinin mikrobiyal aktiviteyi ve organik asit salınımını teşvik etmesi, Zn'un kök bölgesine taşınmasını artırmaktadır (Edwards ve ark., 2007; Kabata-Pendias, 2011).

Fosfor uygulamalarının Zn alımı üzerindeki etkisi, literatürde hem antagonistik hem de sinerjik olarak rapor edilmiştir. Fazla fosfor uygulaması, özellikle çözünmeyen Zn-fosfat komplekslerinin oluşumuna yol açarak çinko alımını engelleyebilir (Loneragan ve Webb, 1993). Çalışmada TSP ve TSP+Biochar gibi yüksek çözünür P içeren uygulamalarda Zn alımının düşük düzeyde kalması bu mekanizma ile açıklanabilir.

Çizelge 4.98. Mısır bitkisi Zn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Zn (mg/kg) |       |       |           |         |                   |                    |   |
|--------|------------------|------------|-------|-------|-----------|---------|-------------------|--------------------|---|
|        |                  | Min.       | Max.  | Ort.  | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |   |
| Asidik | Kontrol          | 48.02      | 57.16 | 52.03 | 4.672     | 21.826  | 8.98              | 1.02               | - |
|        | TSP              | 51.75      | 55.55 | 53.54 | 1.909     | 3.646   | 3.57              | 0.51               | - |
|        | TSP+Biochar      | 39.53      | 47.25 | 43.09 | 3.894     | 15.164  | 9.04              | 0.67               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 47.81      | 57.16 | 51.42 | 5.026     | 25.258  | 9.77              | 1.57               | - |
|        | TSP+AG           | 39.31      | 45.02 | 42.33 | 2.870     | 8.236   | 6.78              | -0.52              | - |
|        | HKF              | 51.00      | 66.06 | 57.89 | 7.611     | 57.930  | 13.15             | 0.74               | - |
|        | HKF+Biochar      | 42.52      | 52.67 | 49.07 | 5.682     | 32.282  | 11.58             | -1.71              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 59.07      | 64.23 | 61.60 | 2.582     | 6.664   | 4.19              | 0.17               | - |
|        | HKF+AG           | 47.42      | 52.96 | 49.77 | 2.863     | 8.194   | 5.75              | 1.20               | - |
| Nötr   | Kontrol          | 40.88      | 43.79 | 42.10 | 1.509     | 2.278   | 3.58              | 1.25               | - |
|        | TSP              | 17.38      | 20.67 | 19.06 | 1.647     | 2.711   | 8.64              | -0.23              | - |
|        | TSP+Biochar      | 14.11      | 15.79 | 14.94 | 0.840     | 0.706   | 5.62              | 0.14               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 23.53      | 27.75 | 25.35 | 2.170     | 4.710   | 8.56              | 1.13               | - |
|        | TSP+AG           | 20.47      | 22.21 | 21.21 | 0.897     | 0.805   | 4.23              | 1.17               | - |
|        | HKF              | 44.75      | 50.30 | 47.52 | 2.775     | 7.701   | 5.84              | 0.01               | - |
|        | HKF+Biochar      | 18.83      | 21.71 | 20.14 | 1.458     | 2.127   | 7.24              | 0.80               | - |
|        | HKF+Vermikompost | 26.11      | 26.70 | 26.31 | 0.335     | 0.112   | 1.27              | 1.73               | - |
|        | HKF+AG           | 26.86      | 29.77 | 27.90 | 1.623     | 2.634   | 5.82              | 1.70               | - |
| Bazik  | Kontrol          | 9.08       | 11.22 | 9.84  | 1.195     | 1.427   | 12.14             | 1.70               | - |
|        | TSP              | 10.62      | 11.41 | 10.97 | 0.403     | 0.162   | 3.67              | 0.96               | - |
|        | TSP+Biochar      | 8.61       | 10.13 | 9.46  | 0.777     | 0.604   | 8.21              | -1.02              | - |
|        | TSP+Vermikompost | 14.89      | 15.47 | 15.23 | 0.304     | 0.093   | 2.00              | -1.38              | - |
|        | TSP+AG           | 13.53      | 16.60 | 14.66 | 1.690     | 2.856   | 11.53             | 1.67               | - |
|        | HKF              | 10.42      | 12.26 | 11.13 | 0.990     | 0.979   | 8.89              | 1.57               | - |
|        | HKF+Biochar      | 11.35      | 11.87 | 11.60 | 0.260     | 0.068   | 2.24              | 0.23               | - |
|        | HKF+Vermikompost | 18.64      | 20.41 | 19.27 | 0.992     | 0.983   | 5.15              | 1.71               | - |
|        | HKF+AG           | 18.48      | 22.44 | 19.97 | 2.152     | 4.631   | 10.78             | 1.62               | - |

Ham kaya fosfat düşük çözünürlüğe sahip olduğu için bu tür antagonistik etkiyi daha az göstermekte, özellikle organik materyallerle birlikte kullanıldığında çinko alımını artırmaktadır. Asidik ve nötr topraklarda HKF+Vermikompost ve HKF+AG uygulamaları yüksek Zn içerikleriyle öne çıkmıştır.

Çizelge 4.99. Mısır bitkisinin Zn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p<0.05$ ).

| Uygulamalar      | Zn (mg/kg) |         |         |
|------------------|------------|---------|---------|
|                  | Asidik     | Nötr    | Bazik   |
| Kontrol          | 52.03 bc   | 42.10 b | 9.84 c  |
| TSP              | 53.54 bc   | 19.06 d | 10.97 c |
| TSP+Biochar      | 43.09 d    | 14.94 e | 9.46 c  |
| TSP+Vermikompost | 51.42 bc   | 25.35 c | 15.23 b |
| TSP+AG           | 42.33 d    | 21.21 d | 14.66 b |
| HKF              | 57.89 ab   | 47.52 a | 11.13 c |
| HKF+Biochar      | 49.07 cd   | 20.14 d | 11.60 c |
| HKF+Vermikompost | 61.60 a    | 26.31 c | 19.27 a |
| HKF+AG           | 49.77 bcd  | 27.90 c | 19.97 a |

Çinko gibi mikro besin elementlerinin bitkiler tarafından alınabilirliği, toprak pH'sına, organik materyallerin kullanımına ve gübrelerin çözünürlük özelliklerine bağlı olarak büyük farklılıklar göstermektedir. Özellikle HKF+Vermikompost uygulaması, Zn alımını arttırmaya yönelik oldukça etkili bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Sürdürülebilir tarımda mikro besin yönetiminin önemi düşünüldüğünde, bu tür uygulamaların üzerinde daha fazla durulmalıdır.

#### 4.3.9. Mısır bitkisi bakır içeriği

Mısır bitkisinin bakır içeriği değişim katsayıları asidik ve nötr toprakta düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bazik toprakta HKF+AG grubunun bakır içeriğinin orta derece değişkenlik gösterdiği diğer tüm grupların ise düşük derece değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.100). Çarpıklık değeri (skewness) incelendiğinde asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde de mısır bitkisinin Cu değerlerinin normal dağılım gösterdiği saptanmıştır.

Mısır bitkisi Cu sonuçları yapılan uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p<0.05$ ). Yapılan Duncan test sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.101’de verilmiştir. Buna göre asidik toprakta en yüksek Cu içeriği 7.37 mg/kg ile HKF grubunda, en düşük değer ise 5.73 mg/kg ile TSP+AG uygulamasında belirlenmiştir. Nötr toprakta en yüksek değer 7.31 mg/kg ile HKF+AG, en düşük ise TSP+Biochar (5.85 mg/kg) ve HKF+Biochar (5.87 mg/kg) uygulamalarında gözlenmiştir. Bazik toprakta en yüksek Cu değerleri 9.97 mg/kg ve 9.99 mg/kg ile TSP+Biochar ve HKF+Biochar uygulamalarında tespit edilmiştir. Üç farklı pH koşulundaki tüm uygulamalarda bitki Cu içeriği “yeterli” aralığında bulunmuştur.

Fosfor uygulamalarının bitkilerde bakır alımı üzerinde genellikle antagonistik etki oluşturmaktadır. Bu etki bazı çalışmalarda, fosfat iyonlarının toprak çözeltisinde Cu ile çözünmeyen kompleksler oluşturması nedeniyle Cu’un alınabilirliğinin azalması ile açıklanmaktadır (Marschner, 2012). Bu nedenle, çalışmada bazı TSP bazlı uygulamaların (örneğin TSP+AG) mısır bitkisinin Cu içeriğini düşürdüğü gözlenmiştir. Öte yandan, TSP+Biochar uygulamasının bazik toprakta yüksek Cu alımına yol açması, biocharın mikro besin elementleri için geçici olarak bağlayıcı rol oynadığı, ancak belirli koşullarda Cu’un salınımını artırabileceğini düşündürmektedir (Lehmann ve Joseph, 2009). Vermikompost uygulaması mikrobiyal aktivitenin artışı ve humik/fulvik asit üretimiyle toprakta Cu’un çözünürlüğünü artırma potansiyeline sahiptir. Özellikle nötr toprakta HKF+AG grubunda en yüksek Cu içeriği (7.31 mg/kg) elde edilmiştir. Bu durumun humik bileşiklerin Cu ile kompleks oluşturarak kök çevresinde hareketinin artmasından kaynaklanabileceğini göstermiştir (Stevenson, 1995; Kabata-Pendias, 2011). Ancak, bazı ahır gübresi uygulamalarında Cu içeriğinin düşük kalması, bu materyalin yüksek Ca içeriği ile antagonistik etki göstermesi veya bağlanmış organik Cu formlarının bitki

Çizelge 4.100. Mısır bitkisi Cu analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Cu (mg/kg) |       |      |           |         |                   |                    |   |
|--------|------------------|------------|-------|------|-----------|---------|-------------------|--------------------|---|
|        |                  | Min.       | Max.  | Ort. | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |   |
| Asidik | Kontrol          | 5.59       | 7.29  | 6.61 | 0.901     | 0.813   | 13.63             | -1.48              | - |
|        | TSP              | 6.18       | 7.25  | 6.76 | 0.541     | 0.293   | 8.00              | -0.78              | - |
|        | TSP+Biochar      | 6.03       | 8.17  | 6.77 | 1.210     | 1.465   | 17.87             | 1.72               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 5.79       | 6.57  | 6.22 | 0.396     | 0.157   | 6.37              | -0.87              | - |
|        | TSP+AG           | 5.66       | 5.88  | 5.73 | 0.127     | 0.016   | 2.22              | 1.73               | - |
|        | HKF              | 6.73       | 8.02  | 7.37 | 0.645     | 0.416   | 8.75              | 0.07               | - |
|        | HKF+Biochar      | 6.29       | 7.45  | 7.06 | 0.670     | 0.449   | 9.49              | -1.73              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 5.95       | 7.02  | 6.52 | 0.538     | 0.289   | 8.25              | -0.52              | - |
|        | HKF+AG           | 5.54       | 6.26  | 5.80 | 0.402     | 0.162   | 6.93              | 1.70               | - |
| Nötr   | Kontrol          | 6.23       | 6.90  | 6.52 | 0.345     | 0.119   | 5.29              | 1.16               | - |
|        | TSP              | 6.31       | 6.72  | 6.51 | 0.206     | 0.042   | 3.16              | 0.36               | - |
|        | TSP+Biochar      | 5.38       | 6.51  | 5.85 | 0.588     | 0.346   | 10.05             | 1.30               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 5.79       | 6.16  | 6.00 | 0.191     | 0.037   | 3.18              | -1.22              | - |
|        | TSP+AG           | 6.25       | 7.04  | 6.63 | 0.395     | 0.156   | 5.96              | 0.19               | - |
|        | HKF              | 5.75       | 6.55  | 6.21 | 0.412     | 0.170   | 6.63              | -1.15              | - |
|        | HKF+Biochar      | 5.40       | 6.40  | 5.87 | 0.503     | 0.253   | 8.57              | 0.53               | - |
|        | HKF+Vermikompost | 6.04       | 6.50  | 6.29 | 0.234     | 0.055   | 3.72              | -0.86              | - |
|        | HKF+AG           | 6.86       | 7.91  | 7.31 | 0.541     | 0.292   | 7.40              | 1.15               | - |
| Bazik  | Kontrol          | 4.46       | 5.47  | 4.94 | 0.507     | 0.257   | 10.26             | 0.50               | - |
|        | TSP              | 6.13       | 7.26  | 6.71 | 0.565     | 0.320   | 8.42              | -0.19              | - |
|        | TSP+Biochar      | 8.99       | 10.96 | 9.97 | 0.985     | 0.970   | 9.88              | 0.02               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 5.52       | 6.08  | 5.56 | 0.297     | 0.088   | 5.34              | -1.47              | - |
|        | TSP+AG           | 4.85       | 5.43  | 5.22 | 0.324     | 0.105   | 6.21              | -1.70              | - |
|        | HKF              | 4.90       | 6.28  | 5.37 | 0.788     | 0.621   | 14.67             | 1.73               | - |
|        | HKF+Biochar      | 9.31       | 11.35 | 9.99 | 1.175     | 1.380   | 11.76             | 1.73               | - |
|        | HKF+Vermikompost | 5.96       | 6.70  | 6.36 | 0.373     | 0.139   | 5.86              | -0.63              | - |
|        | HKF+AG           | 5.13       | 7.08  | 6.10 | 0.975     | 0.951   | 15.98             | 0.08               | - |

tarafından doğrudan alıma uygun olmamasıyla açıklanabilir. Biochar ile birlikte yapılan uygulamalar ise bazik toprakta dikkat çekici bir etki göstermiştir. TSP+Biochar ve HKF+Biochar gruplarında yüksek Cu değerleri (9.97 ve 9.99 mg/kg) elde edilmiştir. Bu bulgular, biyokömürün porozitesi, pH tamponlama kapasitesi ve katyon değişimi ile Cu'un kök bölgesinde tutulmasını desteklediğini düşündürmektedir (Glaser ve ark., 2002; Lehmann ve Joseph, 2009).

Çizelge 4.101. Mısır bitkisinin Cu analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Cu (mg/kg) |         |          |
|------------------|------------|---------|----------|
|                  | Asidik     | Nötr    | Bazik    |
| Kontrol          | 6.61 abc   | 6.52 b  | 4.94 d   |
| TSP              | 6.76 abc   | 6.51 b  | 6.71 b   |
| TSP+Biochar      | 6.77 abc   | 5.85 b  | 9.97 a   |
| TSP+Vermikompost | 6.22 abc   | 6.00 b  | 5.56 bcd |
| TSP+AG           | 5.73 c     | 6.63 ab | 5.22 cd  |
| HKF              | 7.37 a     | 6.21 b  | 5.37 bcd |
| HKF+Biochar      | 7.06 ab    | 5.87 b  | 9.99 a   |
| HKF+Vermikompost | 6.52 abc   | 6.29 b  | 6.36 bc  |
| HKF+AG           | 5.80 bc    | 7.31 a  | 6.10 bcd |

Sonuç olarak, fosforlu gübre kaynağı, organik materyal tipi ve toprak pH'sının etkileşimi mısır bitkisinin Cu alımı üzerine oldukça etkilidir. Özellikle ham kaya fosfat ile birlikte vermikompost gübresi veya biochar uygulamaları, Cu alımını optimize etmede etkili olmuştur.

#### 4.3.10. Mısır bitkisi mangan içeriği

Mısır bitkisinin mangan içeriği değerlerinde değişim katsayıları asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde de düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.102). Çarpıklık değeri (skewness) incelendiğinde her üç topraktada mısır bitkilerinin Mn değerlerini normal dağılım gösterdiği görülmektedir.

Asidik toprakta en yüksek Mn içeriği 181.13 mg/kg ile TSP uygulamasında, en düşük içerikler ise TSP+Vermikompost (56.45 mg/kg), TSP+AG (49.14 mg/kg), HKF+Biochar (60.06 mg/kg), HKF+Vermikompost (61.70 mg/kg) ve HKF+AG (58.72 mg/kg) uygulamalarında ölçülmüştür (Çizelge 4.103). Nötr toprakta tüm uygulamaların aynı istatistiksel grupta yer aldığı ve aralarında anlamlı fark bulunmadığı belirlenmiştir. Bazik toprakta en yüksek Mn içeriği TSP (55.62 mg/kg) uygulamasında, en düşük içerik ise TSP+Vermikompost (29.52 mg/kg) uygulamasında gözlenmiştir (Çizelge 4.103). Mn içeriği sınıflamasına göre, tüm uygulamalar ve toprak grupları “yeterli” sınır aralığında yer almıştır.

Toprak reaksiyonu, mangan çözünürlüğünün en kritik belirleyicisidir. Özellikle pH >6.5 olduğunda  $Mn^{2+}$  formu hızla oksitlenerek bitki tarafından alınamaz hale gelen  $MnO_2$  formuna dönüşmektedir (Marschner, 2012). Bu çalışma kapsamında da bazik topraklarda Mn içeriklerinin, asidik ve nötr topraklara kıyasla daha düşük seviyelerde seyrettiği gözlenmiştir. En yüksek Mn içeriği asidik toprakta TSP uygulamasında (181.13 mg/kg) görülürken, en düşük değer bazik toprakta TSP+Vermikompost uygulamasında (29.52 mg kg<sup>-1</sup>) belirlenmiştir. Benzer bulgular Toprak (2022) tarafından ortaya konulmuş olup, Mn alımının düşük pH ile pozitif korelasyon gösterdiği belirtilmiştir.

Fosfor ve mangan arasındaki ilişki genellikle antagonistik olarak tanımlanmaktadır. Yüksek fosfor düzeyleri, Mn ile benzer taşınım yollarını kullanması nedeniyle Mn alımını baskılayabilmektedir (Chen ve ark., 2022). Bu çalışmada, bazı TSP uygulamalarında Mn içeriğinin düşük çıkması (örneğin TSP+Vermikompost ve TSP+AG) bu antagonizmayı destekler niteliktedir. Ancak dikkat çekici bir şekilde TSP uygulamasının tek başına, asidik ve bazik topraklarda en yüksek Mn alımına neden olduğu görülmüştür. Bu durum,

Çizelge 4.102. Mısır bitkisi Mn analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | Mn (mg/kg) |        |        |           |         |                   |                    |          |
|--------|------------------|------------|--------|--------|-----------|---------|-------------------|--------------------|----------|
|        |                  | Min.       | Max.   | Ort.   | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |          |
|        |                  |            |        |        |           |         |                   | Skewness           | Kurtosis |
| Asidik | Kontrol          | 104.90     | 113.79 | 108.59 | 4.633     | 21.468  | 4.27              | 1.31               | -        |
|        | TSP              | 167.72     | 197.16 | 181.13 | 14.893    | 221.827 | 8.22              | 0.77               | -        |
|        | TSP+Biochar      | 77.26      | 89.88  | 84.27  | 6.424     | 41.272  | 7.62              | -0.93              | -        |
|        | TSP+Vermikompost | 53.13      | 58.85  | 56.45  | 2.961     | 8.769   | 5.25              | -1.23              | -        |
|        | TSP+AG           | 47.78      | 51.40  | 49.14  | 1.971     | 3.884   | 4.01              | 1.63               | -        |
|        | HKF              | 143.70     | 158.95 | 152.57 | 7.923     | 62.766  | 5.19              | -1.27              | -        |
|        | HKF+Biochar      | 50.27      | 66.20  | 60.06  | 8.571     | 73.470  | 14.27             | -1.57              | -        |
|        | HKF+Vermikompost | 57.87      | 68.78  | 61.70  | 6.141     | 37.711  | 9.95              | 1.72               | -        |
|        | HKF+AG           | 55.62      | 61.57  | 58.72  | 2.983     | 8.898   | 5.08              | -0.38              | -        |
| Nötr   | Kontrol          | 42.30      | 63.52  | 54.45  | 10.942    | 119.718 | 20.10             | -1.17              | -        |
|        | TSP              | 52.99      | 58.70  | 55.17  | 3.083     | 9.504   | 5.59              | 1.59               | -        |
|        | TSP+Biochar      | 44.53      | 55.41  | 51.02  | 5.738     | 32.922  | 11.25             | -1.43              | -        |
|        | TSP+Vermikompost | 54.57      | 67.75  | 59.63  | 7.103     | 50.451  | 11.91             | 1.58               | -        |
|        | TSP+AG           | 51.89      | 57.05  | 54.67  | 2.604     | 6.780   | 4.76              | -0.69              | -        |
|        | HKF              | 47.80      | 50.12  | 48.78  | 1.200     | 1.439   | 2.46              | 1.21               | -        |
|        | HKF+Biochar      | 56.44      | 61.67  | 59.36  | 2.668     | 7.117   | 4.49              | -0.98              | -        |
|        | HKF+Vermikompost | 50.14      | 59.51  | 54.44  | 4.732     | 22.394  | 8.69              | 0.71               | -        |
|        | HKF+AG           | 53.94      | 65.93  | 58.29  | 6.635     | 44.025  | 11.38             | 1.68               | -        |
| Bazik  | Kontrol          | 38.12      | 45.18  | 42.23  | 3.669     | 13.459  | 8.69              | -1.28              | -        |
|        | TSP              | 51.46      | 60.11  | 55.62  | 4.334     | 18.787  | 7.79              | 0.34               | -        |
|        | TSP+Biochar      | 45.51      | 49.59  | 47.31  | 2.081     | 4.330   | 4.40              | 0.97               | -        |
|        | TSP+Vermikompost | 29.01      | 30.51  | 29.52  | 0.855     | 0.731   | 2.90              | 1.73               | -        |
|        | TSP+AG           | 29.66      | 32.63  | 31.10  | 1.487     | 2.211   | 4.78              | 0.27               | -        |
|        | HKF              | 35.16      | 38.70  | 36.58  | 1.869     | 3.493   | 5.11              | 1.44               | -        |
|        | HKF+Biochar      | 45.84      | 54.94  | 51.26  | 4.793     | 22.973  | 9.35              | -1.42              | -        |
|        | HKF+Vermikompost | 47.89      | 55.73  | 51.74  | 3.922     | 15.383  | 7.58              | 0.17               | -        |
|        | HKF+AG           | 31.70      | 38.94  | 34.34  | 3.998     | 15.986  | 11.64             | 1.68               | -        |

TSP'nin toprak çözeltisinde geçici asitleşmeye neden olarak Mn çözünürlüğünü artırmasından kaynaklanıyor olabilir (Hinsinger ve ark., 2003). Organik materyallerin topraklara uygulanması, mikrobiyal aktiviteyi artırarak Mn'un mineralizasyonunu hızlandırmakta ve  $Mn^{2+}$  formunun çözeltide daha uzun süre kalmasına olanak sağlamaktadır (Stevenson, 1995). Dolayısıyla, vermikompost ve ahır gübresi gibi organik materyaller Mn alımını pozitif etkileyebilir. Ancak bu çalışmada, TSP veya HKF ile birlikte kullanılması durumunda organik materyallerin bazı durumlarda Mn alımını sınırlandırdığı görülmektedir. Bu durumun, organik materyallerdeki kalsiyum içeriği veya pH'yı tamponlama etkisiyle Mn'un oksitlenmesine neden olmasından kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir. Özellikle HKF+Biochar uygulamasında Mn alımında dikkat çekici bir düşüş gözlenmiştir. Biocharın yüksek pH etkisi ve yüzey adsorpsiyonu ile  $Mn^{2+}$ 'yi bağlayarak alınabilirliğini sınırladığı bilinmektedir (Glaser ve ark., 2002). Ancak bazı çalışmalarda biocharın gözenekli yapısıyla Mn'un kök bölgesinde tutulmasını desteklediği, dolayısıyla bu etki uygulama dozuna ve toprak özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilir.

Çizelge 4.103. Mısır bitkisinin Mn analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar ( $p < 0.05$ ).

| Uygulamalar      | Mn (mg/kg) |         |          |
|------------------|------------|---------|----------|
|                  | Asidik     | Nötr    | Bazik    |
| Kontrol          | 108.59 c   | 54.45 a | 42.23 c  |
| TSP              | 181.13 a   | 55.17 a | 55.62 a  |
| TSP+Biochar      | 84.27 d    | 51.02 a | 47.31 bc |
| TSP+Vermikompost | 56.45 e    | 59.63 a | 29.52 e  |
| TSP+AG           | 49.14 e    | 54.67 a | 31.10 de |
| HKF              | 152.57 b   | 48.78 a | 36.58 d  |
| HKF+Biochar      | 60.06 e    | 59.36 a | 51.26 ab |
| HKF+Vermikompost | 61.70 e    | 54.44 a | 51.74 ab |
| HKF+AG           | 58.72 e    | 58.29 a | 34.34 de |

Sonuç olarak, Mn alımı gübre formuna, toprağın pH düzeyine ve organik materyallerin kimyasal özelliklerine bağlı olarak büyük değişkenlik göstermektedir. TSP uygulamaları özellikle asidik ortamlarda Mn alımını destekleyici rol oynarken, bazı organik materyaller özellikle bazik ortamlarda Mn alımını sınırlayabilmektedir. Bu bağlamda, Mn alımını artırmak için fosfor kaynağı ve organik materyal özelliklerinin dikkate alınarak gübreleme programlarının hazırlanması daha uygun olacaktır.

#### 4.3.11. Mısır bitkisi bor içeriği

Mısır bitkisinin bor içeriği değişim katsayıları incelendiğinde üç toprak grubunda değişim katsayılarının düşük değişkenlik gösterdiği görülmektedir (Çizelge 4.104).Çarpıklık değeri (skewness) asidik, nötr ve bazik toprakların üçünde mısır bitkisinin B değerlerini normal dağılım gösterdiği saptanmıştır.

Saksı denemesinde yetiştirilen mısır bitkisinin B analiz sonuçları uygulamalara göre Duncan testi ile karşılaştırılmıştır ( $p<0,05$ ). Yapılan Duncan test sonucu elde edilen veriler Çizelge 4.105’de verilmiştir. Asidik toprakta en yüksek B içeriği 22.41 mg/kg ile HKF+AG, en düşük içerik 11.76 mg/kg ile TSP+Biochar uygulamasında gözlenmiştir. Nötr toprakta yine en yüksek içerik HKF +AG (10.95 mg/kg), en düşük değerler ise TSP (8.45 mg/kg) ve TSP+Biochar (8.09 mg/kg) gruplarında saptanmıştır. Bazik toprakta en yüksek B içeriği yine HKF+AG (37.24 mg/kg), en düşük değer ise HKF (26.32 mg/kg) uygulamasında ölçülmüştür. Bor içerikleri, asidik ve nötr toprakta tüm uygulamalarda "yeterli", bazik toprakta ise tamamı "fazla" sınıfında yer almıştır.

Elde edilen veriler, özellikle HKF+AG uygulamasının her üç pH grubunda da en yüksek bor içeriğine ulaşarak istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar oluşturduğunu göstermiştir. Bu durum, bor elementinin alınabilirliğinde sadece toprakta mevcut miktarın değil, aynı zamanda toprağın kimyasal ortamını etkileyen organik materyallerin varlığının da önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bor, toprak çözeltisinde en çok  $B(OH)_3$  formunda bulunur ve bu formun alımı kökler tarafından pasif difüzyonla gerçekleşir. Bu nedenle borun mobilitesi ve alımı, toprak nemi, pH ve organik madde ile doğrudan ilişkilidir (Marschner, 2012). Ahır gübresi ve vermikompost gibi materyallerin toprağa uygulanması, mikrobiyal aktiviteyi ve humik asit üretimini artırarak borun mobilitesini ve bitki tarafından kullanılabilirliğini yükseltebilir (Stevenson, 1995; Demirtaş, 2006).

Toprak (2022) tarafından yürütülen çalışmada da, fosforca zenginleştirilmiş organomineral gübre uygulamalarının toprakta alınabilir bor içeriğini 24.2 mg/kg (1. yıl) ve 17.3 mg/kg (2. yıl) oranında artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, çalışmamızda organik materyallerle birlikte yapılan fosforlu gübre uygulamalarının bor alımını artırdığı yönündeki sonuçlarla örtüşmektedir.

Çizelge 4.104. Mısır bitkisi B analiz sonuçları ve bazı istatistiksel değerler.

| Toprak | Uygulamalar      | B (mg/kg) |       |       |           |         |                   |                    |   |
|--------|------------------|-----------|-------|-------|-----------|---------|-------------------|--------------------|---|
|        |                  | Min.      | Max.  | Ort.  | Std. Sap. | Varyans | Değişim Katsayısı | Çarpıklık-Basıklık |   |
| Asidik | Kontrol          | 14.37     | 16.07 | 15.31 | 0.866     | 0.751   | 5.66              | -0.95              | - |
|        | TSP              | 12.82     | 14.66 | 13.98 | 1.012     | 1.024   | 7.24              | -1.66              | - |
|        | TSP+Biochar      | 11.41     | 12.32 | 11.76 | 0.488     | 0.238   | 4.15              | 1.55               | - |
|        | TSP+Vermikompost | 14.07     | 17.68 | 16.10 | 1.847     | 3.410   | 11.47             | -1.03              | - |
|        | TSP+AG           | 14.40     | 16.46 | 15.37 | 1.035     | 1.071   | 6.73              | 0.49               | - |
|        | HKF              | 11.51     | 15.35 | 13.87 | 2.066     | 4.267   | 14.90             | -1.57              | - |
|        | HKF+Biochar      | 12.00     | 14.27 | 13.22 | 1.144     | 1.308   | 8.65              | -0.63              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 14.03     | 15.41 | 14.80 | 0.703     | 0.494   | 4.75              | -0.94              | - |
|        | HKF+AG           | 20.06     | 23.70 | 22.41 | 2.041     | 4.166   | 9.11              | -1.71              | - |
| Nötr   | Kontrol          | 8.16      | 9.89  | 8.82  | 0.937     | 0.878   | 10.62             | 1.61               | - |
|        | TSP              | 7.66      | 9.05  | 8.45  | 0.716     | 0.512   | 8.47              | -1.14              | - |
|        | TSP+Biochar      | 7.62      | 8.44  | 8.09  | 0.424     | 0.180   | 5.24              | -1.22              | - |
|        | TSP+Vermikompost | 8.13      | 10.96 | 9.09  | 1.622     | 2.632   | 17.84             | 1.73               | - |
|        | TSP+AG           | 9.60      | 11.56 | 10.43 | 1.012     | 1.025   | 9.70              | 1.19               | - |
|        | HKF              | 10.18     | 11.20 | 10.57 | 0.551     | 0.303   | 5.21              | 1.59               | - |
|        | HKF+Biochar      | 8.06      | 9.05  | 8.71  | 0.563     | 0.317   | 6.46              | -1.73              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 8.49      | 10.54 | 9.25  | 1.125     | 1.267   | 12.16             | 1.66               | - |
|        | HKF+AG           | 9.92      | 11.70 | 10.95 | 0.922     | 0.851   | 8.42              | -1.24              | - |
| Bazik  | Kontrol          | 29.36     | 33.76 | 31.10 | 2.340     | 5.475   | 7.52              | 1.50               | - |
|        | TSP              | 30.44     | 34.24 | 32.16 | 1.925     | 3.707   | 5.99              | 0.81               | - |
|        | TSP+Biochar      | 33.26     | 36.41 | 35.12 | 1.652     | 2.730   | 4.70              | -1.38              | - |
|        | TSP+Vermikompost | 33.09     | 39.25 | 36.77 | 3.250     | 10.566  | 8.84              | -1.44              | - |
|        | TSP+AG           | 30.71     | 39.44 | 35.33 | 4.387     | 19.243  | 12.42             | -0.51              | - |
|        | HKF              | 24.39     | 29.94 | 26.32 | 3.137     | 9.843   | 11.92             | 1.72               | - |
|        | HKF+Biochar      | 31.53     | 40.86 | 36.88 | 4.815     | 23.184  | 13.06             | -1.18              | - |
|        | HKF+Vermikompost | 30.14     | 33.20 | 31.20 | 1.736     | 3.013   | 5.56              | 1.72               | - |
|        | HKF+AG           | 33.58     | 39.65 | 37.24 | 3.224     | 10.396  | 8.66              | -1.49              | - |

Toprak pH'sı yükseldikçe (özellikle pH > 7.5) borun toprak çözeltisindeki konsantrasyonu azalmaktadır (Goldberg, 1997). Bu çalışmada dikkat çekici şekilde, bazik topraklarda tüm uygulamalarda bitki bor içeriklerinin “fazla” kategorisinde yer aldığı gözlenmiştir. Bu sonuç şaşırtıcı olmakla birlikte, toprakta bor formunun yüksek düzeyde bulunması ve organik materyallerle birlikte mobilizasyonun artmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca biochar uygulamalarının, pH artırıcı etkisinin yanı sıra yüzey adsorpsiyon kapasitesiyle boru geçici olarak tutarak kök bölgesine salınımını dengeleyebileceği belirtilmektedir (Lehmann ve Joseph, 2009; Glaser ve ark., 2002). Biochar, yüksek katyon değişim kapasitesi, yüzey alanı ve tamponlama kapasitesi ile toprak ortamının kimyasal dengesini etkileyebilir (Alma, 2021). Ancak bu çalışmada TSP+Biochar uygulaması asidik ve nötr topraklarda en düşük bor içeriğine sahip olmuştur. Bu durum, biocharın bazı durumlarda borun toprağa adsorbe olmasına yol açarak alımını sınırlandırabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.105. Mısır bitkisinin B analiz sonuçları ve istatistiksel gruplar (p<0.05).

| Uygulamalar      | B (mg/kg) |           |           |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
|                  | Asidik    | Nötr      | Bazik     |
| Kontrol          | 15.31 bc  | 8.82 bcd  | 31.10 bc  |
| TSP              | 13.98 bcd | 8.45 d    | 32.16 ab  |
| TSP+Biochar      | 11.76 d   | 8.09 d    | 35.12 ab  |
| TSP+Vermikompost | 16.10 b   | 9.09 bcd  | 36.77 ab  |
| TSP+AG           | 15.37 bc  | 10.43 abc | 35.33 ab  |
| HKF              | 13.87 bcd | 10.57 ab  | 26.32 c   |
| HKF+Biochar      | 13.22 cd  | 8.71 cd   | 36.88 ab  |
| HKF+Vermikompost | 14.80 bc  | 9.25 abcd | 31.20 abc |
| HKF+AG           | 22.41 a   | 10.95 a   | 37.24 a   |

Bor, alımı hassas dengeye bağlı olan ve eksikliği kadar fazlalığı da toksik etkiler yaratabilen bir mikro besin elementidir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, fosforlu gübrelerin organik materyallerle birlikte kullanılması halinde bor alımının optimize edilebileceğini göstermiştir. Özellikle ahır gübresi ile birlikte uygulanan öğütülmüş fosfatın, asidik, nötr ve bazik topraklarda bor alımını artırarak mısır bitkisinin fizyolojik ihtiyaçlarını yeterli düzeyde karşıladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, sürdürülebilir tarım uygulamalarında organik ve mineral gübrelerin birlikte kullanımının sadece makro değil, mikro besin elementlerinin yönetimi açısından da stratejik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

## 5. SONUÇ

Bu çalışma, farklı pH'lı (asidik, nötr ve bazik) topraklara uygulanan farklı fosfor kaynakları (TSP ve ham kaya fosfat) ile çeşitli organik materyaller (biochar, vermikompost ve ahır gübresi) toprağın kimyasal ve biyolojik özelliklerine etkilerini kapsamlı bir biçimde ortaya koymuştur. Bulgular, organik materyal ve fosfor kaynağı etkileşiminin toprak verimliliği üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir.

Toprakların EC değerlerinde gözlemlenen artışlar, özellikle vermikompost ve ahır gübresi gibi mikrobiyal aktiviteyi teşvik eden materyallerle ilişkilendirilmiştir. Buna karşın biochar, yüzey özellikleri nedeniyle iyon adsorpsiyonuna yol açarak EC değerlerini düşürebilmiştir.

Toplam organik madde açısından en etkili uygulamalar ahır gübresi ve vermikompost olmuştur. Bu materyaller, mikrobiyal ayrışmayı ve humus oluşumunu teşvik ederek toprak karbon havuzuna önemli katkılar sunmaktadır. Biochar ise kısa vadede organik madde artışına sınırlı katkı sağlasa da, uzun vadede kararlı karbon birikimi ile toprak yapısına olumlu etkiler sağlayabilir.

Asidik topraklarda, fosfor kaynakları ile organik materyal uygulamaları pH değerini önemli ölçüde artırarak besin elementlerinin yararlanılabilirliğini yükseltmiştir. Özellikle HKF + AG ve vermikompost kombinasyonları, bu etkiyi maksimize etmiştir. Nötr topraklarda, ham kaya fosfat ile ahır gübresi veya vermikompost uygulamaları toplam ve inorganik fosfor düzeylerini en üst seviyelere çıkarmıştır. Bu etki, fosfat çözücü mikroorganizmaların (örneğin *Pseudomonas*, *Bacillus*) nötr pH'da daha aktif olmasıyla açıklanabilir. Bazik topraklarda ise yüksek pH'nın fosfor fiksasyonunu artırması beklenen bir durum olup, organik asit üretimi sayesinde bu etki kısmen bertaraf edilmiştir.

Çalışmanın hem inkübasyon denemesinde hem de bitkili saksı denemesinde asidik, nötr ve bazik reaksiyonlu topraklarda fosfor adsorpsiyon kapasitesi, tüm toprak tiplerinde fosfor adsorpsiyonunun 1. saatten itibaren hızla arttığını ve 3. günde maksimum düzeye ulaştığını, ardından 5. ve 7. günlerde bu artışın yavaşladığını ortaya koymuştur. Analiz sonuçları incelendiğinde, özellikle TSP+Vermikompost ve HKF+Vermikompost uygulamalarının, her üç toprak grubunda da en yüksek fosfor adsorpsiyon kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir.

Potasyum ve kalsiyum gibi bazik katyonların miktarı, özellikle HKF+AG ve HKF+Vermikompost kombinasyonlarında anlamlı şekilde artmıştır. Bu durum, hem mineral kaynaklı hem de organik katkılarla sağlanan K ve Ca bileşiklerinin çözünürlüğünün artmasıyla açıklanabilir.

Yapılan bu çalışmanın sonucunda, toprak reaksiyonuna göre uygulama yapılması önerilmektedir. Asidik topraklarda alkaline etki gösteren “HKF + AG” kombinasyonu önerilirken, bazik koşullarda fosfor fiksasyonunu azaltmak için vermikompost gibi organik asit üretici materyaller tercih edilmelidir. Ayrıca farklı fosfor kaynakları ile organik materyallerin kombine bir şekilde kullanılması önerilir. Fosfor kaynaklarının humik maddelerce zengin organik materyallerle birlikte uygulanması, hem çözünür fosfor miktarını hem de mikrobiyal fosfor döngüsünü desteklemektedir.

Uygulanan vermikompost ve kaya fosfatı oranlarına bağlı olarak, en yüksek demir (Fe) içeriği vermikompost uygulamasında elde edilmiştir. Vermikompostun biyolojik olarak aktif bileşenlerinin metallerin şelatlanmasına ve mobilizasyonuna katkı sağladığını düşünülmektedir. Çinko içeriği iki uygulamada da (HKF ve vermikompost) kademeli olarak artış göstermiştir. Zn’nin toprakta hareketli hale gelmesi için gerekli olan düşük pH ve redoks potansiyeli gibi koşullar, vermikompostun parçalanması sürecinde geçici olarak oluşabilmektedir. Bakır içeriği ise daha çok vermikompostun yüksek dozlarında artış göstermiştir. Vermikompostun içerdiği kompleks organik moleküllerin bakır ile şelat yaparak onun toprak çözeltisine geçişini kolaylaştırmasından kaynaklanabilir. Mn ise en fazla HKF uygulamasında tespit edilmiştir. Bu sonuç, Mn’nin çözünürlüğünün pH ile ters orantılı olmasıyla ilişkilidir. HKF parçalanması sonucu toprağın pH’sında meydana gelen bölgesel değişiklikler, Mn’ı etkileyerek hareketli formda toprak çözeltisine geçmesini teşvik etmiştir.

Araştırmada elde edilen bulgular, özellikle yüksek doz vermikompost uygulamalarının bor içeriğini artırma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bor içeriğindeki artışın özellikle vermikompost uygulamasında en yüksek düzeye ulaşması, bu uygulamanın mikro element mobilizasyonunu teşvik edici rolünü bir kez daha ortaya koymuştur. Bununla birlikte, topraktaki borun fazlasının bitki gelişimi üzerinde toksik etki yaratabileceği de göz önünde bulundurulmalı ve uygulama dozları dikkatli bir şekilde planlanmalıdır. Bu verilerin ışığında, hem vermikompost hem de ham kaya fosfatının toprağa uygulanması, mikro elementlerin bitkiye yararlılığını artırmada önemli bir

strateji olarak değerlendirilebilir. Genel olarak değerlendirildiğinde, vermikompostun mikrobiyal aktiviteyi artırıcı, kompleks yapılar oluşturucu ve toprağın fiziksel-kimyasal ortamını iyileştirici etkisi mikro elementlerin biyoyararlılığını artırmada etkili olmuştur. Mikrobiyal biyokütle, topraktaki fosforun geçici depolayıcısı ve dönüşüm motoru olarak görev görmekte; bu yapı fosforun mineralizasyon ve immobilizasyon süreçlerinde merkezi rol oynamaktadır.

Toprakta fosfataz enzimi aktivitesine baktığımızda, her iki uygulama da (HKF ve vermikompost) aktiviteyi artırmış, ancak en yüksek değer yine vermikompost uygulamasında elde edilmiştir. Fosfataz enzimleri, özellikle organik fosfor bileşiklerinin hidrolizi ile bitkiye yararlı inorganik fosfatın serbest bırakılmasında kritik öneme sahiptir. Fosfataz aktivitesindeki artış, toprak mikrobiyal florasının bu süreçteki aktif rolü ve vermikompostun enzimatik üretim koşullarını iyileştirmesiyle ilişkilendirilebilir. Dehidrogenaz enzimi aktivitesi toprakta genel mikrobiyal solunumun bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir ve sonuçlarını incelediğimizde özellikle vermikompost uygulamalarında yüksek düzeylerde saptanmıştır. Dehidrogenaz enzimi, hücre içi solunum reaksiyonlarında görev aldığından mikrobiyal canlılık düzeyini yansıtan bir parametredir. Vermikompostun mikrobiyal topluluklara sunduğu enerji kaynakları (özellikle düşük moleköl ağırlıklı organik maddeler) sayesinde enzimatik aktivitenin yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Araştırmada elde edilen verilerin ışığında, vermikompostun toprak biyolojik özelliklerini iyileştirme potansiyeli, mikrobiyal biyokütle ve enzimatik faaliyetler bakımından oldukça önemli olduğunu söyleyebiliriz.

Araştırmanın, saksı çalışması kısmında yetiştirilen mısır bitkisinde özellikle HKF uygulamaları fosfor içeriği üzerinden mısırın besin alımını desteklemiş, ancak vermikompost kadar belirgin bir etki ortaya koymamıştır. Mısır yaprağının besin elementi analizlerinde, özellikle N, P, K, Ca, Fe ve Zn gibi makro ve mikro besin elementlerinin alımında vermikompostun belirgin katkısı gözlenmiştir. Bu artış, hem organik bileşiklerin çözünür formda element sağlaması hem de mikrobiyal süreçlerin toprak-besin ilişkilerini iyileştirmesiyle açıklanabilir. Araştırma sonuçları mısır bitkisinin gelişimi ve verimi açısından organik madde katkılı gübre uygulamaları büyük öneme sahip olduğunu göstermiştir. Organik ve inorganik fosfor kaynaklarının dengeli ve birlikte kullanımı, mısır gibi yüksek besin ihtiyacı olan bitkilerde tarımsal üretim verimliliğini artırmak adına önerilmektedir.

Çalışma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, biochar kullanımında dikkatli olunması gerektiğini net bir şekilde göstermiştir. Kısa vadede adsorbe etme özelliği nedeniyle sınırlayıcı olabilen biochar, EC dengesi sağlama ve karbon depolama yönünden avantajlar sunsa da uygulama dozu ve zamanı dikkatle belirlenmelidir. Ayrıca çalışma sonuçlarını ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik açısından değerlendirdiğimizde, özellikle düşük çözünürlüklü fosfat kaynaklarının (örneğin HKF) organik materyallerle birlikte kullanılması, dışa bağımlı mineral gübre ihtiyacını azaltarak sürdürülebilir tarım hedeflerine katkı sağlayabileceği görülmüştür. Uygulanan organik materyaller içerisinde ise özellikle vermikompost uygulamasının, başta toprağın biyolojik özellikleri olmak üzere, toprağın pek çok özelliğinde iyileştirici yönde katkı sağladığı görülmektedir. Bu durum sürdürülebilir tarımda gübre programı hazırlanırken dikkate alınmalıdır. Bulgular, her bölgenin toprak yapısına özel gübreleme ve organik materyal kullanım stratejilerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma fosfor yönetiminin yalnızca kimyasal form seçimiyle değil, aynı zamanda toprak reaksiyonu, mikrobiyal aktivite ve organik katkılarla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, toprak ve bitki sağlığı ile besin elementi yarıyışlılığını sürdürülebilir biçimde artırma yolunda etkili bir strateji sunmaktadır

## KAYNAKLAR

- Abd-Alla, M. H. 1994. Phosphatases and the utilization of organic phosphorus by *Rhizobium leguminosarum* biovar *viceae*. *Letters in Applied Microbiology*, 10(6), 294-296. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.1994.tb00873.x>
- Abdelaziz Ali, M. G., ve Kızılkaya, R. 2023. Effects of different organic materials on plant weight and dehydrogenase activity in the rhizosphere of strawberry plants. Conference Paper, Ondokuz Mayıs University, Türkiye. <https://www.researchgate.net/publication/377329974>
- Açıkbaş, B., 2016. Vermikompostun 5 BB üzerine aşılı Trakya İlkeren asma fidanlarının bitki besin elementi içerikleri ve vejetatif gelişmesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Afangide, A. I., Ekpe, I. I., Okoli, N. H., ve Egboka, N. T. 2020. Dynamics of Phosphatase Enzyme and Microbial Properties in a Degraded Ultisol Amended with Animal Manures. *Journal Clean WAS*, 4(1), 21–27. <https://doi.org/10.26480/jcleanwas.01.2020.21.27>
- Agegehu, G., Nelson, P. N., ve Bird, M. I. 2016. The effects of biochar, compost and their mixture and mineral fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of barley grown on a Nitisol in the Ethiopian highlands. *Soil Use and Management*, 32(4), 574–585. <https://doi.org/10.1111/sum.12294>.
- Agyarko-Mintah, E., Cowie, A., Harden, S., Forster, M., ve Singh, B. P. 2017. Biochar increases nitrogen retention and availability in low fertility soils. *Soil Research*, 55(4), 354–365. <https://doi.org/10.1071/SR16040>
- Aira, M., Monroy, F., ve Domínguez, J. 2002. How earthworm density affects microbial biomass and activity in pig manure. *European Journal of Soil Biology*, 38, 7-10.
- Aira, M., Monroy, F., ve Domínguez, J. 2007. Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry. *Science of the Total Environment*, 385, 252-261.
- Akhtar, M., McCallister, D.L., Francis, D.D. ve Schepers J.S., 2005. Manure Source Effects on Soil Phosphorus Fractions and Their Distribution. *Soil Science*, 170(3). DOI: 10.1097/01.ss.0000160030.00061.c2
- Allison, L. E. ve Moodie, C. D., 1965. Carbonate. In: C.A. Black et al. (Eds.). *Methods of Soil Analysis, Part 2. Agronomy* 9: 1379-1400. Am. Soc. of Agron., Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Alloway, B. J. 2008. *Zinc in Soils and Crop Nutrition* (2nd ed.). IZA and IFA. [https://www.fertilizer.org/images/Library\\_Downloads/2008\\_zinc\\_in\\_soils.pdf](https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2008_zinc_in_soils.pdf)

- Álvarez-Fernández, A., Abadía, J., ve Abadía, A. 2006. Iron Deficiency, Fruit Yield and Fruit Quality. Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms, Chapter 4, 85-101.
- Alma, M. H. 2021. Biyokömür ve Toprak Fiziksel Özellikleri. Biyokömür ve Toprak Verimliliği Üzerine Etkileri, 11(4), 2599–2612.
- Amede, T., Schulz, S., Wopereis, M., ve van Asten, P. 2021. Integrated soil fertility management for sustainable intensification in smallholder farming systems. Field Crops Research, 270, 108205. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108205>
- Amyanpoori, A., Ovassi, M. ve Fatahinejad, E., 2015. Effect Of Vermicompost And Triple Superphosphate On Yield Of Corn (Zea mays L) In Behbahan. Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, December - 2015; Volume – 3 (VI). DOI: [http://dx.doi.org/10.18006/2015.3\(6\).494.499](http://dx.doi.org/10.18006/2015.3(6).494.499)
- Anderson, J. P. E., ve Domsch, K. H. 1990. Application of ecophysiological parameters to evaluate effects of pesticides on soil microorganisms. Soil Biology and Biochemistry, 22(4), 675–683.
- Antil, R. S. Ve Raj, D., 2012. Evalution of maturity and stability parameters of composts prepared from farm wastes. Archives of Agronomy and Soil Science. Vol. 58, No. 8; 817-832.
- Antonious, G. F., Turley, E. T., ve Dawood, M. H. 2020. Monitoring Soil Enzymes Activity before and after Animal Manure Application. Agriculture, 10(5), 166. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050166>
- Atkinson, C.J. ve Fitzgerald, J.D., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. Plant Soil (2010) 337:1–18.
- Aydeniz, A., ve Brohi, R., 1991a. Hamfosfat-reaksiyon ilişkileri. I. Marulun verimliliğine etki. Cumhuriyet Üniversitesi Tokat Ziraat Fakültesi Dergisi, 7(1) 267-290.
- Aydeniz, A., ve Brohi, R., 1991b. Hamfosfat-reaksiyon ilişkileri. II. Arpanın verimliliğine etki. Cumhuriyet Üniversitesi Tokat Ziraat Fakültesi Dergisi, 7(1) 291-316.
- Aydeniz, A., ve Brohi, R., 1991c. Hamfosfat-reaksiyon ilişkileri. III. Pamuğun verimliliğine etki. Cumhuriyet Üniversitesi Tokat Ziraat Fakültesi Dergisi, 7(1) 317-340.
- Ayers, R. S., ve Westcot, D. W. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1.

- Barrow, N. J. 2017. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant and Soil*, 410, 401–410. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3008-9>
- Bayraklı, B., 2020. Kaya fosfat ve TSP gübresi ile uygulanan *Micrococcus luteus* AR-72'nin toprağın bazı biyolojik özellikleri, NO<sub>3</sub> ve alınabilir P içeriğine etkisi. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi* 8(2) 157 – 166.
- Becagli, M., Arduini, I., ve Cardelli, R. 2022. Using biochar and vermiwash to improve biological activities of soil. *Agriculture*, 12(2), 178. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020178>
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B., ve Sizmur, T. 2011. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 159(12), 3269–3282. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.07.023>
- Bellitürk, K., 2011. Edirne ili Uzunköprü ilçesi tarım topraklarının beslenme durumlarının belirlenmesi. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi* 8(3) 8-15.
- Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., ve Moral, R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Bertrand, I., Holloway, R. E., Armstrong, R. D., ve McLaughlin, M. J. 2006. Chemical characteristics of phosphorus fertilizers affect phosphorus availability. *Soil Science Society of America Journal*, 70(3), 889–898.
- Bertrand, I., McLaughlin, M.J., Holloway, R.E., Armstrong, R.D. ve McBeath, T., 2006. Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(1) 27-40.
- Bhavya, G., Chandra Shaker, K., Jayasree, G., ve Malla Reddy, M. 2018. Effect of integrate use of phosphorus, PSB and vermicompost on acid and alkaline phosphatase activity and yield of green gram (*Vigna radiata* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(1), 1465–1468. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.701.178>
- Biswal, B., Meena, S. L., Paul, S., Babu, S., Mandal, B. N., Meena, M. C., Shivay, Y. S., Dash, R., ve Tahashildar, M. 2023. Effect of organic manures and lime on nutrient availability and soil enzyme activity under upland rice in North Eastern Himalayan Region. *Environment Conservation Journal*, 24(1), 42–50. <https://doi.org/10.36953/ECJ.9402195>
- Blake, L., Johnston, A. E., Poulton, P. R., ve Goulding, K. W. T. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil*, 254, 245–261.

- Boruah, T., ve Deka, H. 2023. Comparative investigation on synergistic changes in enzyme activities during vermicomposting of cereal grain processing industry sludge employing three epigeic earthworm species. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 123324–123334. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31043-0>
- Bray, R. H., ve Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*, 59, 39-45.
- Bruun, E. W., Müller-Stöver, D., Ambus, P., ve Hauggaard-Nielsen, H. 2012. Application of biochar to soil and N<sub>2</sub>O emissions: potential effects of quality, quantity and placement. *Science of the Total Environment*, 447, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.067>
- Burns, R. G., DeForest, J. L., Marxsen, J., Sinsabaugh, R. L., Stromberger, M. E., Wallenstein, M. D., Weintraub, M. N., ve Zoppini, A., 2013. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 216–234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
- Busato, J. G., Papa, G., Canellas, L. P., Adani, F., Oliveira, A. L., ve Leão, T. P. 2016. Phosphatase activity and its relationship with physical and chemical parameters during vermicomposting of filter cake and cattle manure. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(4), 1223–1230. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7210>
- Busato, J. G., Ferrari, L. H., Chagas Junior, A. F., da Silva, D. B., Pereira, T. dos S., ve de Paula, A. M. 2020. Trichoderma strains accelerate maturation and increase available phosphorus during vermicomposting enriched with rock phosphate. *Journal of Applied Microbiology*, 130(5), 1490–1500. <https://doi.org/10.1111/jam.14847>
- Bouyoucos, G.S., 1962. A Recalibration of the Hydrometer Methods for Making Mechanical Analysis of Soil. *Agronomy Journal*, 43.
- Braos, L.B., 2014. Organic Phosphorus Fraction in Soil Fertilized With Cattle Manure. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 39:140-150.
- Bremner, J.M., 1965. Inorganic forms of nitrogen, methods of soil analysis, 1179-1237.
- Brinck, J.N., 1978. World Resources of Phosphorus. In: *Phosphorus in The Environment: Its Chemistry and Biochemistry*. Ciba Foundation Sym. 57: 23- 63.
- Brohi, A.R., Özcan, S., Savaşlı, E. ve Aktaş A., 2000. Çeşitli fosforlu gübrelerin buğday bitkisinin verim ve bazı bitki besin maddesi alımına etkisi. *GOÜ. Ziraat Fakültesi Dergisi* 2000, 17 (I) 129-132.

- Büyükfiliz, F., 2016. Vermikompost gübrelemesinin ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) bitkisinin verim ve bazı kalite parametreleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Campdelacreu Rocabruna, P., Domene, X., Matteazzi, A., Figl, U., Fundneider, A., Fernández-Martínez, M., Venir, E., Robatscher, P., Preece, C., Peñuelas, J., ve Peratoner, G. 2024. Effect of organic fertilisation on soil phosphatase activity, phosphorus availability and forage yield in mountain permanent meadows. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 368, 109006. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109006>
- Cao, D., Lan, Y., Yang, X., Chen, W., Jiang, L., Wu, Z., Li, N., ve Han, X. 2023. Phosphorus fractions in biochar-amended soil — chemical sequential fractionation, <sup>31</sup>P NMR, and phosphatase activity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(2), 169–181. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1967327>
- Carson, P.L., 1980. Recommended potassium test. P.20-21. İn: Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region. Rev. Ed. North Central Regional Publication no.221. North Dakota Agric. Exp. Stn. North Dakota State University, Fargo. USA.
- Cartwright, B., Rathjen, A.J., Sparrow, D.H.B., Paull, J.G. ve Zarcinas, B.A., 1985. Boron Tolerance in Australian varieties of wheat and barley. in: Genetic Aspects of Plant Nutrition, 16-20 June 1985 Madison, USA (eds. W.H. Gabelman, B.C. Loughman) Dordrecht, Netherlands, Martinus Nijhoff 139-151.
- Chan, K. Y., ve Xu, Z. 2009. Biochar: nutrient properties and their enhancement. In Lehmann, J. & Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan.
- Chang, S. C., ve Jackson, M. L. 1958. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 84(2), 133–144.
- Chen, H., Yuan, J., Chen, G., Zhao, X., Wang, S., Wang, D., Wang, L., Wang, Y., ve Wang Y., 2022. Long-term biochar addition significantly decreases rice rhizosphere available phosphorus and its release risk to the environment. *Chen et al. Biochar*, 4:54, 1-15. DOI: 10.1007/s42773-022-00178-7
- Chen, P., Zhou, Y., Xie, Q., Chen, T., Liu, H., Xue, S., Zao, X., Wei, L., Xu, L., Zhang, X., ve Rosso, K. M., 2022. Phosphate adsorption kinetics and equilibria on natural iron and manganese oxide composites. *Journal of Environmental Management*, 323, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116222>
- Chen, L., Zhou, S., Zhang, Q., Zou, M., Yin, Q., Qiu, Y., ve Qin, W., 2024. Effect of organic material addition on active soil organic carbon and microbial diversity: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 241, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106128>

- Cheng, Y., Liu, Q., Lu, Y., Zhang, L., ve Wang, J. 2021. Phosphorus dynamics and adsorption following triple superphosphate application in Ferralsol under tropical conditions. *Environmental Pollution*, 284, 117436. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117436>
- Chien, S. H., Prochnow, L. I., ve Cantarella, H. 2011. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, 102, 267–322. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(09\)01008-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(09)01008-6)
- Ciurli, A., Giagnoni, L., Segal, D., Pastorelli, R., Varanini, Z., Renella, G. ve Zamboni, A., 2023. A novel FePO<sub>4</sub> nanosized fertilizer is as effective as triple superphosphate in sustaining the growth of cucumber plants. *Pedosphere*, Volume 35, Issue 2, April 2025, Pages 405-414. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2023.12.005>
- Clarkson, D. T., 1981. Nutrient interception and transport by root systems. *Physiological processes limiting plant productivity*, 307-330.
- Cui, J., Yang, B., Zhang, M., Song, D., Xu, X., Ai, C., Liang, G., ve Zhou, W., 2023. Investigating the effects of organic amendments on soil microbial composition and its linkage to soil organic carbon: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 894, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164899>
- Çağatay, M., Kacar, B., Ülgen, N., Alemdar, N., ve Turan, C., 1973. Türkiye Şartlarında Türkiye Hamfosfatlarının Ziraate Faydalılık Nispetlerinin Tayini Üzerine Bir Araştırma. *Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Tarım Ormancılık Araştırma Grubu*, Sayı:25.
- Das, S.K., Mukherjee, I. ve Kumar, A., 2015. Effect of soil type and organic manure on adsorption-desorption of fubendiamide. *Environ Monit Assess* 187(7) 403
- Das, S.G. ve Ghosh G.K., 2021. Developing biochar-based slow-release N-P-K fertilizer for controlled nutrient release and its impact on soil health and yield. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02069-6>
- Das, S. K., Ghosh, G. K., Avasthe, R. K., et al. 2023. Organic nutrient sources and biochar technology on microbial biomass carbon and soil enzyme activity in maize–black gram cropping system. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 9277–9287. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01625-4>
- Demirtaş, M. İ. 2006. Bitki Besin Elementleri. Atatürk Üniversitesi Yayınları.
- Demirtaş, E.I., Öktüren Asri, F., Özkan, C.F. ve Arı, N., 2012. Organik ve kimyasal gübre uygulamalarının örtüaltı domates yetiştiriciliğinde toprak verimliliği ve bitkinin beslenmesine etkileri. *Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Derim Dergisi*, 2012, 29 (1) 9-22.

- Demirbaş, A. 2021. The Effect of Different Phosphorus Doses Application on Yield and Nutrient Uptake of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Plant. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(2), 420–424. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i2.420-424.4174>
- Diatta, A. A., Fike, J. H., Battaglia, M. L., Galbraith, J. M., ve Baig, M. B., 2020. Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 13:595, 1-17. DOI: 10.1007/s12517-020-05586-2
- Dick, R. P. 1994. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In J. W. Doran et al. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 107–124). SSSA Special Publication No. 35.
- Dodor, D. E. ve Tabatabai, M. A., 2003. Effect of Cropping Systems on Phosphatases in Soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166: 7-13.
- Domínguez, J., ve Edwards, C. A. 2011. Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. In C. A. Edwards et al. (Eds.), *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management* (pp. 27–40). CRC Press.
- Dotaniya, M. L., Nagar, M. C., Sharma, A., Dotaniya, C. K., Singh, V. B., Dotaniya, R. K., ve Saha, J. K., 2023. Management of acid and alkaline phosphatase, dehydrogenase activities by sugarcane industry waste under lead contamination. *PLoS ONE*, 18(5): e0286223. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286223>
- Doyeni, M. O., Suproniene, S., Barauskaite, K., ve Tilvikiene, V. 2023. Animal manure digestate fertilization effect on the soil microbial activity and crop productivity in the northern part of temperate climate conditions–Lithuania. *Geoderma Regional*, 34, e00699. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00699>
- Dvorackova, H., ve Dvoracek, J. 2023. Manure application followed by biochar application increases plant production regardless of soil dehydrogenase activity. *Soil Use and Management*, 39(4), 1557–1569. <https://doi.org/10.1111/sum.12936>
- Edmeades, D. C. 2003. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 66(2), 165–180.
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q., ve Sherman, R. L. 2007. *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press.
- Eghball, B., Binford, G. D., ve Baltensperger, D. D. 1996. Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application. *Journal of Environmental Quality*, 25(6), 1339–1343.

- Ekka, A. A., Singh, R. N., ve Patel, B. 2023. Studies on fly ash, lime and vermicompost incorporation on urease and dehydrogenase activities in an acid soil under rice crop. *The Pharma Innovation Journal*, 12(7), 2470–2473. [ISSN: 2277-7695]. <https://www.thepharmajournal.com/>
- Erdal, İ., Bozkurt, M.A., Cimrin, M., Karaca, S. ve Sağlam, M., 2000. Kireçli bir toprakta yetiştirilen mısır bitkisi gelişimi ve fosfor alımı üzerine humik asit ve fosfor uygulamasının etkisi. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 24: 664-668.
- Erden, Z., 2023. Fosfat Çözücü Bakteri, İnorganik Fosforlu Gübre Ve Tavuk Gübresi Uygulamalarının Mercimekte (*Lens Culinaris* L.) Verim ve Verim Öğeleri Üzerine Etkileri. Siirt Üni., Fan Bilimleri Enst. Doktora Tezi.
- Eryüksel, S., 2016. Farklı oranlarda vermikompost uygulamasının bazı sebzelerin besin elementi içeriklerine olan etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Fageria, N. K. 2001. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1269–1290. <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>
- Fageria, N. K., ve Baligar, V. C. 2008. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, 99, 345–399. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0)
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., ve Clark, R. B. 2011. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77, 185–268. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)77015-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77015-6)
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., ve Jones, C. A. 2011. *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops*. CRC Press.
- Fageria, N. K., ve Stone, L. F., 2006. Physical, Chemical, and Biological Changes in the Rhizosphere and Nutrient Availability. *Journal of Plant Nutrition*, 29(7), 1327–1356. <https://doi.org/10.1080/01904160600767682>
- Fei, C., Zhang, S., Zhang, L., ve Ding, X. 2023. Straw is more effective than biochar in mobilizing soil organic phosphorus mineralization in saline-alkali paddy soil. *Applied Soil Ecology*, 186, 104848. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104848>
- Foster, E. J., Fogle, E. J., ve Cotrufo, M. F. 2018. Sorption to biochar impacts  $\beta$ -glucosidase and phosphatase enzyme activities. *Agriculture*, 8(10), 158. <https://doi.org/10.3390/agriculture8100158>
- Freitas, J.R., Schoenau, J. J., Boyetchko, S. M., ve Cyrenne, A. A., 2003. Soil microbial populations, community composition, and activity as affected by repeated applications of hog and cattle manure in eastern Saskatchewan. *Canadian Journal of Microbiology*, 49(9), 538-548. <https://doi.org/10.1139/w03-069>

- Gahoonia, T.S., Nielsen, N.E. ve Ole, B.L., 1999. Phosphorus (P) Acquisition of Cereal Cultivars in The Field at Three Levels of P Fertilization. *Plant and Soil* 211: 269-281.
- Gallet, A., Flish, R., Ryser, J., Frossard, E. ve Sinaj, S., 2003. Effect of Phosphate Fertilization on Crop Yield and Soil Phosphorus Status. *J. Plant Nutr.*
- Gallet, A., Flish, R., Ryser, J., Nosberger, J., Frossard, E. ve Sinaj, S., 2003. Uptake of Residual Phosphate and Freshly Diammonium Phosphate by *Lolium Perenne* and *Trifolium Repens*. *J. Plant Nutr. Sci.* 166: 557-56
- Gao, S., ve DeLuca, T. H. 2018. Wood biochar impacts soil phosphorus dynamics and microbial communities in organically-managed croplands. *Soil Biology and Biochemistry*, 126, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.002>
- García-Gil, J. C., Plaza, C., Soler-Rovira, P., ve Polo, A. 2000. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13), 1907–1913. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00164-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00164-7)
- Gatiboni, L.C., Kaminski, J., Rheinheimer, D.S. ve Brunetto, G., 2003. Superphosphate and rock phosphates as phosphorus sources for grass-clover pasture on a limed acid soil in Southern Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34 (17-18) 2503-2514.
- Gawde, N., Tiwari, A., Sushma, Samadhiya, V., Sahu, N., Ekka, A. A., Patel, B., Verma, P., ve Naya, N. 2023. Quantification of soil dehydrogenase enzyme activities in long-term fertilizer experiment under rice-wheat cropping system on Vertisol. *The Pharma Innovation Journal*, 12(8), 1930–1934. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2023/vol12issue8/PartAD/12-7-397-363.pdf>
- George, D., ve Mallery, M. (2010). *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference*, 17.0 update (10a ed.) Boston: Pearson.
- George, T. S., Turner, B. L., Gregory, P. J., Cade-Menun, B. J., ve Richardson, A. E., 2006. Depletion of organic phosphorus from Oxisols in relation to phosphatase activities in the rhizosphere. *European Journal of Soil Science*, 57, 47-57. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00767.x>
- Gerke, J. 1992. Phosphate, aluminium and iron in the soil solution of three different soils in relation to varying concentrations of citric acid. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 155(4), 339–343.
- Glaser, B., Lehmann, J., ve Zech, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – A review.

- Biology and Fertility of Soils, 35(4), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>.
- Glaser, B. ve Lehr, V. 2019. Effects of biochar on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 9:9338.
- Goldberg, S. 1997. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193(1), 35–48. <https://doi.org/10.1023/A:1004216126069>
- Goldberg, S., Lesch, S. M., ve Suarez, D. L., 2000. Predicting Boron Adsorption by Soils Using Soil Chemical Parameters in the Constant Capacitance Model. *Soil Science Society of American Journal*, 64(4), 1356–1363. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441356x>
- Goldberg, S., ve Suarez, D. L. 2006. Prediction of anion adsorption and transport in soil systems using the constant capacitance model. *Interface Science and Technology*, 11, 491–517. [https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(06\)80062-1](https://doi.org/10.1016/S1573-4285(06)80062-1)
- Gong, X., Xu, J., Zou, L., Huang, J., Zhang, B., Yang, X., ve Jiang, J. 2023. Evaluation of green waste, green waste compost and cow dung as amendments for white wine distillers' grains vermicomposting. *Environmental Technology*. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2288658>
- Grant, C. A., Flaten, D. N., Tomasiewicz, D. J., ve Sheppard, S. C. 2001. The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*, 81(2), 211–224.
- Geissler, B., Mew, M. C., ve Steiner, G. 2019. Phosphate supply security for importing countries: Developments and the current situation. *Science of the Total Environment*, 677, 511–523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.356>
- Gu, C., ve Margenot, A. J. 2020. Navigating limitations and opportunities of soil phosphorus fractionation. *Plant and Soil*.
- Guera, C., ve Fonseca, A. 2022. Long-term impact of phosphorus sources on soil phosphorus fractions and chemical attributes in integrated crop-livestock systems. *Field Crops Research*, 290, 108727. DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108727
- Guerena, D., Lehmann, J., Hanley, K., Enders, A., Hyland, C. and Riha, S., 2013. Nitrogen dynamics following field application of biochar in a temperate North American maize-based production system. *Plant Soil*. 2013, 365: 239–254.
- Guo, L., Wang, C., Feng, T. Y., ve Shen, R. F. 2023. Short-term application of organic fertilization impacts phosphatase activity and phosphorus-mineralizing bacterial communities of bulk and rhizosphere soils of maize in acidic soil. *Plant and Soil*, 484, 95–113. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05775-w>

- Guppy, C. N., Menzies, N. W., Moody, P.W., ve Blamey, F. P. C., 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Soil Research*, 43(6), 789–795.
- Gupta, U. C. 1993. *Boron and Its Role in Crop Production*. CRC Press.
- Hati, K. M., Mandal K. G., Misra, A. K., Ghosh, P.K., ve Bandyopadhyay, K. K., 2006. Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, and water-use efficiency of soybean in Vertisols of central India. *Bioresource Technology*, 97, 2182–2188.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., ve Beaton, J. D. 2014. *Soil Fertility and Fertilizers* (8th ed.). Pearson Education.
- Haynes, R. J. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant and Soil*, 68(3), 289–308. <https://doi.org/10.1007/BF02197937>
- He, Z.L., Yao, H., Calvert, D.V., Stoffella, P.J., Yang, X.E., Chen, G. ve Lloyd, G.M., 2005. Dissolution characteristics of central florida phosphate rock in an acidic sandy soil, *Plant and Soil*, 273, 157-166.
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B., ve Chauhan, B. S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970–976.
- Hınıslı, N., 2014. Vermikompost gübresinin kıvrıkcık bitkisinin gelişmesi üzerine etkisinin belirlenmesi ve diğer bazı organik kaynaklı gübrelerle karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Hinsinger, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237, 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>
- Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., ve Jaillard, B. 2003. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to plant and soil properties. *Plant and Soil*, 248(1), 43–59.
- Horwath, W.R. ve Paul, E.A. 1994. Microbial biomass. Pages 753-773 in R.W. Weaver, S. Angle, P.Bottomley, D. Bezdicek, S. Smith, A. Tabatabai, and A. Wollum, editors. *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*. Soil Science Society of America, Segoe, Wisconsin, USA.
- Hossain, M. S., Jotisankasa, A., Aramrak, S., Nishimur, S., ve Yodsudyai, W., 2024. Influence of Biochar on Unsaturated Hydraulic Characteristics of a Tropical Residual Silty Sand. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10-78. <https://doi.org/10.1007/s40891-024-00588-6>

- Hue, N. V. 1992. Correcting Soil Acidity of a Highly Weathered Ultisol With Chicken Manure and Sewage Sludge. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23(3),241-264. <https://doi.org/10.1080/00103629209368586>
- Husk, B. ve Major, J., 2008. Commercial Scale Agricultural Biochar Field Trial in Quebec, Canada, Over Two Years: Effects of Biochar on Soil Fertility, Biology, Crop Productivity and Quality; Blue Leaf: Quebec, QC, Canada, 2008; pp. 1–38.
- Islam, M.R., Bilkis, S., Hoque, T.S., Uddin, S., Jahiruddin, M., Rahman, M.M., Siddique, A.B., Hossain, M.A., Danso Marfo, T. ve Danish, S., 2021. Mineralization of Farm Manures and Slurries under Aerobic and Anaerobic Conditions for Subsequent Release of Phosphorus and Sulphur in Soil. *Sustainability* 2021, 13, 8605. <https://doi.org/10.3390/su13158605>
- Jenkinson, D. S., Harris, H. C., Ryan, J., McNeill, A. M., Pilbeam, C. J., ve Coleman, K. 2004. Organic carbon turnover in a calcareous clay soil from Syria under a two-course cereal rotation. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(7), 945–958. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.02.005>
- Jha, S., Kumar, R., Kumar, M., Kumar, R., ve Padbhushan, R. 2023. Enriching vermicompost with rock phosphate applied with inorganic fertilizers improves soil biological quality in calcareous soil. *The Pharma Innovation Journal*, 12(3), 4870–4874. [ISSN: 2277-7695]. <https://www.thepharmajournal.com/>
- Jin, Y., Liang, X., He, M., Liu, Y., Tian, G., ve Shi, J. 2015. Manure biochar influence upon soil properties, phosphorus distribution and phosphatase activities: A microcosm incubation study. *Chemosphere*, 142, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.015>
- Joergensen, R. G., ve Wichern, F. 2008. Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(12), 2977–2991. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.08.017>
- Jones, J. B., Wolf, B., ve Mills, H. A. 1991. *Plant Analysis Handbook*. Micro-Macro Publishing, Inc.
- Kabata-Pendias, A., ve Mukherjee, A. B. 2007. *Trace Elements from Soil to Human*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>
- Kacar, B. ve Katkat, A.V., 1997. Tarımda Fosfor. Bursa Ticaret Borsası Yayınları, No:5, Bursa, 417s.
- Kacar, B. ve Katkat, A.V., 2007b. Bitki Besleme. Nobel Yayın, No:849, 659s.
- Kamran, M. A., Jiang, J., Li, J.-y., Shi, R.-y., Mehmood, K., Baquy, M. A.-A., ve Xu, R.-k. 2018. Amelioration of soil acidity, Olsen-P, and phosphatase activity by

- manure- and peat-derived biochars in different acidic soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 272. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3616-1>
- Kashem, M. A., Sarker, J. R., ve Haque, M. E. 2011. Phosphorus fractions in soil amended with organic and inorganic phosphorus sources. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(1), 1–9.
- Kataria, P., Singh, J., Singh, G., Mavi, M.S., Sillanpää, M., ve Al-Farraj, S. 2024. Residual phosphorus availability after soil application of different organic waste in varying soil P status soils. *Heliyon*, 10, e25732. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25732>
- Kaur, K., Sukul, P., ve Chand, S. 2024. Effect of fly ash and poultry manure on soil enzymatic activities in maize (*Zea mays* L.) crop under Punjab agro climatic condition. *SKUAST Journal of Research*, 26(1), 46–52. <https://doi.org/10.5958/2349-297X.2024.00004.7>
- Keeney, D. R., ve Hatfield, J. L. 2001. The nitrogen cycle, historical perspective, and current and potential future concerns. In *Nitrogen in the Environment: Sources, Problems, and Management* (pp. 1–18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374347-3.00001-9>
- Khadem, A., ve Raiesi, F. 2019. Response of soil alkaline phosphatase to biochar amendments: Changes in kinetic and thermodynamic characteristics. *Geoderma*, 337, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.001>
- Kocaman, A., Turan, M., Tüfenkçi, Ş., Katırcıoğlu, H., Güneş, A., Kıtır, N., Giray, G., Gürkan, B., Ersoy, N., ve Yıldırım, E. 2023. Development of plant-friendly vermicompost using novel biotechnological methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25, 2925–2936. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01726-4>
- Korkmaz, A., Gökmen Yılmaz, F. ve Gezgin, S., 2020. Organomineral gübre ve K-humat'ın tane mısırın verim ve fosfor kullanım etkinliği üzerine etkilerinin kimyasal gübreyle karşılaştırması. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi* 8(2) 137 – 144.
- Kumar, U., Kumar, S., Kumar, N., Yadav, R., Pandey, P., Kumar, S., Samota, R., ve Maurya, A. 2023. Response of graded fertility levels and zinc application method with and without farm yard manure on physicochemical and biological properties of soil under rice crop. *International Journal of Plant ve Soil Science*, 35(20), 1113–1123. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2023/v35i203908>
- Kumar, R., Jha, S., Singh, S. P., Kumar, M., Kumari, R., ve Padbhushan, R. 2023. Organic waste recycling by vermicomposting amended with rock phosphate impacts the stability and maturity indices of vermicompost. *Journal of the Air ve Waste Management Association*, 73(7), 553–567. <https://doi.org/10.1080/10962247.2023.2207504>

- Kumar, P., Sheoran, S., Kamboj, A., Divya, Gurmeet, Kumar, D., ve Raveena. 2023. Effect of Different Organic Manures and Their Levels on Nutrient Status and Soil Microbial Activity under Rose (*Rosa bourboniana* Desportes) Cultivation. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(1), 81–88. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i11636>
- Kumari, M., Sheoran, S., Prakash, D., Yadav, D. B., Yadav, P. K., Jat, M. K., Ankit, ve Apurva. 2024. Long-term application of organic manures and chemical fertilizers improve the organic carbon and microbiological properties of soil under pearl millet-wheat cropping system in North-Western India. *Heliyon*, 10, e25333. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25333>
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Lazcano, C., Arnold, J., Zaller, J. G., ve Domínguez, J. 2008. Compost and vermicompost as nursery pot components: effects on tomato plant growth and morphology. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6(4), 944–951.
- Lee, Y.L., Ahmed, O.H., Wahid, S.A., ve AB Aziz, Z.F., 2020. Effects of Mixture Biochar-Fertilizer with and without Tableting on the Soil Chemical Characteristics. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020, 864, 012100.
- Lee, Y.L., Ahmed, O.H., Wahid, S.A. ve AB Aziz, Z.F., 2021. Biochar Tablets with and without Embedded Fertilizer on the Soil Chemical Characteristics and Nutrient Use Efficiency of *Zea mays*. *Sustainability* 2021, 13, 4878. <https://doi.org/10.3390/su13094878>
- Lehmann, J., 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381-387.
- Lehmann, J., ve Joseph, S. 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan.
- Lehmann, J., ve Joseph, S. 2024. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.
- Lehmann, J., ve Kleber, M. 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., ve Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Lehmann, J., da Silva Jr., J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., ve Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol

- of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249(2), 343–357. <https://doi.org/10.1023/A:1022833116184>
- Leogrande, R., Vitti, C., Castellini, M., Garofalo, P., Samarelli, I., Lacolla, G., Montesano, F. F., Spagnuolo, M., Mastrangelo, M., ve Stellacci, A. M. 2024. Residual Effect of Compost and Biochar Amendment on SoilChemical, Biological, and Physical Properties and DurumWheat Response. *Journal of Agronomy*, 14, 749, 1–18. DOI: 10.3390/agronomy14040749
- Li, J., Shao, X., Huang, D., Liu, K., Shang, J., Zhang, Q., Zhao, T., ve Yang, X. 2022. Short-term biochar effect on soil physicochemical and microbiological properties of a degraded alpine grassland. *Pedosphere*, 32(3), 426–437. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60084-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60084-X)
- Lima, J.R.D.S., Silva, W.D.M., Medeiros, E.V.D., Duda, G.P., Corrêa, M.M., Filho, A.P.M., Clermont-Dauphin, C., Antonino, A.C. ve Hammecker, C., 2018. Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. *Geoderma* 2018, 319, 14–23.
- Lin, M. ve Huybers, P., 2012. Reckoning wheat yield trends. *Environmental Research Letters*, 7(2), 024016.
- Lindsay, W. L., 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley and Sons. New York.
- Lindsay, W. L. ve Norvell, W. A., 1978. Development of DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese and Copper. *Soil Sci. Soc. of Amer. J.*, 42: 421-428.
- Lindsay, W. L., ve Schwab, A. P. 1982. The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5(4–7), 821–840. <https://doi.org/10.1080/01904168209363012>
- Liu, L., Zhang, S., Chen, M., Fei, C., Zhang, W., Li, Y., ve Ding, X. 2023. Fe-modified biochar combined with mineral fertilization promotes soil organic phosphorus mineralization by shifting the diversity of phoD-harboring bacteria within soil aggregates in saline-alkaline paddy soil. *Journal of Soils and Sediments*, 23, 619–633. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03335-4>
- Liu, S., Meng, J., Jiang, L., Yang, X., Lan, Y., Cheng, X., ve Chen, W. 2017. Rice husk biochar impacts soil phosphorous availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. *Applied Soil Ecology*, 116, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.020>
- Loeppert, R. H., ve Inskeep, W. P. 1996. Iron. In *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods* (pp. 639–664). Soil Science Society of America.
- Loneragan, J. F., ve Webb, M. J. 1993. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants. In *Zinc in Soils and Plants* (pp. 119–134). Springer.

- Lopes, É. M. G., Reis, M. M., Frazão, L. A., Terra, L. E. M., Lopes, E. F., Santos, M. M., ve Fernandes, L. A. 2021. Biochar increases enzyme activity and total microbial quality of soil grown with sugarcane. *Environmental Technology ve Innovation*, 21, 101270. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101270>
- Lu, H., Xu, C., Zhang, J., Du, C., Wu, G., ve Luo, L. 2022. The characteristics of alkaline phosphatase activity and phoD gene community in heavy-metal contaminated soil remediated by biochar and compost. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 109(2), 298–303. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03513-7>
- Lu P, O. ve Connor, G. A., 1999. Factors Affecting Phosphorus Reactions in Soils: Potential Sewage Sludge Effects. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* 58: 66-71.
- Lu, P., Zhang, Y., Ji, B., Yan, Y., Wang, Z., Yang, M., Zhang, S., ve Yang, X., 2023. PhoD Harboring Microbial Community and Alkaline Phosphatase as Affected by Long Term Fertilization Regimes on a Calcareous Soil. *Journal of Agronomy*, 13, 363. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020363>
- Lukashe, N. S., Mupambwa, H. A., Green, E., ve Mnkeni, P. N. S. 2019. Inoculation of fly ash amended vermicompost with phosphate solubilizing bacteria (*Pseudomonas fluorescens*) and its influence on vermi-degradation, nutrient release and biological activity. *Waste Management*, 83, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.038>
- Lv, M., Li, J., Zhang, W., Zhou, B., Dai, J., ve Zhang, C. 2020. Microbial activity was greater in soils added with herb residue vermicompost than chemical fertilizer. *Soil Ecology Letters*, 2(3), 209–219. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0034-6>
- Mailakeba, C. D., ve Rajashekhar Rao, B. K. 2020. Biochar Application Does Not Improve the Biochemical Properties of Ni Contaminated Soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 105(5), 633–638. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03001-w>
- Margenot, A. J., Sommer, R., Mukalama, J., ve Parikh, S. J. 2017. Biological P cycling is influenced by the form of P fertilizer in an Oxisol. *Biology and Fertility of Soils*, 53, 899–909. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1226-9>
- Marschner, P. (Ed.). 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Maru, A., Haruna, A. O., Asap, A., Majid, N. M. A., Maikol, N., ve Jeffary, A. V. 2020. Reducing Acidity of Tropical Acid Soil to Improve Phosphorus Availability and Zea mays L. Productivity through Efficient Use of Chicken Litter Biochar and

Triple Superphosphate. *Applied Sciences*, 10(6), 2127. <https://doi.org/10.3390/app10062127>

- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., ve Patra, A. K., 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, 419–435.
- McBride, M. B. 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press.
- McDowell, R.W. ve Sharpley, A.N., 2001. Soil phosphorus fraction in solution: influence of fertiliser and manure, filtration and method of determination. *Chemosphere*, 45, 737-748.
- McGechan, M. B. ve Lewis, D.R., 2002. Sorption of Phosphorus by Soil, Part 1: Principles, Equations and Models. *Biosystems Engineering* 82 (1) 1-24.
- McGrath, S. P., Sanders, J. R., ve Shalaby, M. H. 1988. The effects of soil organic matter levels on soil solution concentrations and extractabilities of manganese, zinc and copper. *Geoderma*, 42(2), 177–188. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(88\)90033-X](https://doi.org/10.1016/0016-7061(88)90033-X)
- Mehdi, S. M., Sajjad, N., Sarfraz, M., Khalid, B. Y., Hassan, G. ve Sadiq, M., 2003. Response of wheat to different phosphatic fertilizers in various textured salt affected soils. *Pakistan Journal Agricultural Sciences* 30: 64–68.
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T. S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D. S., Wearing, C., Zhang, H., ve Haygarth, P. M., 2018. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant and Soil*. 427, 5-16. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2>
- Mengel, K., ve Kirkby, E. A. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. Kluwer Academic Publishers.
- Mikkelsen, R. L. 2005. Potassium dynamics in soils. *Better Crops*, 89(3), 6–8.
- Müftüoğlu, N.M., Ünser, E., Özkan, N. ve Dağlıoğlu, M., 2016. Vermikompostun ıspanak (*Spinacia oleracea* L.) verimi ve bazı toprak özellikleri üzerine etkisi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 4 (1) 1-5.
- Naher, U.A., Biswas, J.C., Maniruzzaman, M., Khan, F.H., Sarker, M.I.U., Jahan, A., Hera, M.H.R., Hossain, M.B., Islam, A., Islam, M.R. ve Kabir, M.S., 2021. Bio-Organic Fertilizer: A Green Technology to Reduce Synthetic N and P Fertilizer for Rice Production. *Front. Plant Sci.* 12: 602052. doi: 10.3389/fpls.2021.602052.

- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., ve Renella, G. 2011. Role of Phosphatase Enzymes in Soil. *Soil Biology, Phosphorus in Action*, 26, 215-243.
- Nayak, S., ve Mishra, C. S. K. 2024. Organic and Biofertilizer Interventions in Iron Mine Spoil for Nutrient Fortification with Facilitation of Microbial Exoenzyme Activity and Plant Growth. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 50(4), xx-xx. <https://doi.org/10.55863/ijeec.2024.0121>
- Niazi, M. H. K., Iqbal, J., Mehdi, S. M. ve Hussain. K., 1991. Comparison of different phosphorus sources for rice and wheat production in sodic soil. *Pakistan Journal Agricultural Sciences* 28: 305–310.
- Nichitha, C.V., Raghavendra, S., Champa, B.V., Ganapathi, G., Sudarshan, V., Nandita, S., Ravikumar, D., ve Nagaraja, M.S. 2023. Role of organic manures on soil carbon stocks and soil enzyme activities in intensively managed ginger production systems. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 12(Special Issue), 109–118. <https://doi.org/10.30486/IJROWA.2023.1977064.1579>
- Nziguheba, G., Palm, C. A., Buresh, R. J., ve Smithson, P. C. 1998. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Biology and Fertility of Soils*, 28, 15–22. <https://doi.org/10.1023/A:1004389704235>
- Nziguheba, G., Zingore, S., Kihara, J., ve Coulibaly, A. 2016. Phosphorus in smallholder farming systems of sub-Saharan Africa: Implications for agricultural intensification. *Agriculture, Ecosystems ve Environment*, 231, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.028>
- Oberson, A., ve Jöner, E. J. 2005. Microbial turnover of phosphorus in soil. In *Phosphorus in Action* (pp. 133–164). Springer.
- Obihara, C. H., ve Russell, R. S. 1972. Specific Adsorption of Silicate and Phosphate By Soils. *Journal of Soil Science*, 23(1), 105-117.
- Oladele, S., Adeyemo, A., Awodun, M., Ajayi, A. ve Fasina, A., 2019. Effects of biochar and nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties, nitrogen use efficiency and upland rice (*Oryza sativa*) yield grown on an Alfisol in Southwestern Nigeria. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 2019, 8: 295–308.
- Oliveira, S. M., ve Ferreira, A. S. 2014. Change in soil microbial and enzyme activities in response to the addition of rock-phosphate-enriched compost. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(21), 2794–2806. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.954286>
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. Ve Dean, L. A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *US. Department of Agriculture Cric*, 939.

- Olsen, S. ve Flowerday, A., 1971. Fertilizer phosphorus interactions in alkaline soils. Fertilizer technology and use.
- Osztoics, E., Csatho, P., Nemeth, T., Baczo, Gy., Magyar, M., Radimszky, L. ve Osztoics, A., 2005. Influence of phosphate fertilizer sources and soil properties on trace element concentrations of redclover. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 36 (4-6) 557-570.
- Palansooriya, K.N., Ok, Y.S., Awad, Y.M., Lee, S.S., Sung, J., Koutsospyros, A. ve Moon, D.H., 2019. Impacts of biochar application on upland agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*. 234 (2019) 52-64.
- Palihakkara, R., Weerasinghe, D., ve Amarasinghe, P. 2025. Effect of triple superphosphate on phosphorus dynamics and soil acidity in tropical rice soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*. DOI: 10.1007/s42729-025-02416-w
- Parfitt, R. L. 1979. The availability of P from phosphate-goethite bridging complexes. *Desalination*, 24(1-3), 347-353.
- Peine, F., Kamh, M., ve Amelung, W. 2019. Effect of triple superphosphate and biowaste compost on mycorrhizal colonization and enzymatic P mobilization under maize in a long-term field experiment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(2), 167-174. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800499>
- Perrott K.W. ve Kear M.J., 2001. Direct application phosphate rock: do soil phosphorus tests take site influence into account? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32 (13-14) 2133-2144.
- Pizzeghello, D., Berti, A., Nardi, S. Ve Morari, F. 2020. Phosphorus forms and P-sorption properties in three alkaline soils after long-term mineral and manure applications in north-eastern Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 141; 1-2, Pages 58-66.
- Pramanik, P., Ghosh, G. K., Ghosal, P. K., ve Banik, P., 2007. Changes in organic – C, N, P and K and enzyme activities in vermicompost of biodegradable organic wastes under liming and microbial inoculants. *Bioresource Technology*, 98, 2485-2494. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.09.017>
- Pramanik, P., Ghosh, G. K., ve Banik, P. 2009. Effect of microbial inoculation during vermicomposting of different organic substrates on microbial status and quantification and documentation of acid phosphatase. *Waste Management*, 29(2), 574-578. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.015>
- Przemieniecki, S. W., Zapałowska, A., Skwiercz, A., Damszel, M., Telesiński, A., Sierota, Z., ve Gorczyca, A. 2021. An evaluation of selected chemical, biochemical, and biological parameters of soil enriched with vermicompost.

- Environmental Science and Pollution Research, 28(7), 8117–8127.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-10981-z>
- Rathore, G., Kaushal, R., Sharma, V., Sharma, G., Chaudhary, S., Dhaliwal, S.S., Alsuhaibani, A.M., Gaber, A., ve Hossain, A. 2023. Evaluation of the Usefulness of Fermented Liquid Organic Formulations and Manures for Improving the Soil Fertility and Productivity of Brinjal (*Solanum melongena* L.). Agriculture, 13(2), 417. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020417>
- Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., ve Shankhdhar, S. C. 2021. Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21, 49–68.  
<https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- Rehman, R. A., ve Qayyum, M. F. 2020. Co-composts of sewage sludge, farm manure and rock phosphate can substitute phosphorus fertilizers in rice-wheat cropping system. Journal of Environmental Management, 259, 109700.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109700>
- Rengel, Z., ve Damon, P. M. 2008. Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. Physiologia Plantarum, 133(4), 624–636.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A., ve Mashali, A. M. 1999. The use of saline waters for crop production. FAO Irrigation and Drainage Paper, 48.
- Richard, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement Saline and Alkaline Soils U.S.D.A. Handbook, 60: 105-106.
- Richardson, A. E., Hocking, P. J., Simpson, R. J., ve George, T. S. 2009. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus. Crop and Pasture Science, 60(2), 124–143. <https://doi.org/10.1071/CP07125>
- Richardson, A. E., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, A. E., Harvey, P. R., Ryan, M. H., Veneklaas, E. J., Lambers, H., Oberson, A., Culvenor, R. A., ve Simpson, R. J., 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. Plant and Soil, 349(1), 121–156. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0950-4>
- Richardson, A. E., ve Simpson, R. J. 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. Plant Physiology, 156(3), 989–996.  
<https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>
- Rousk, J., Brooks, P. C., ve Baath, E., 2009. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. Applied and Environmental Microbiology, 75(6), 1589–1596.  
<https://doi.org/10.1128/AEM.02775-08>

- Roy, R. N., Finck, A., Blair, G. J., ve Tandon, H. L. S. 2006. Plant nutrition for food security: A guide for integrated nutrient management. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 16.
- Sabir, M., Sultan, T., Yaseen, M., Ahmad, R. ve Tara, Z. H., 2021. Comparative Effect of Different Phosphatic Fertilizers on Growth of Rapeseed (*Brassica napus* L.) in Alkaline Calcareous Saline-Sodic Soils, Communications in Soil Science and Plant Analysis, VOL. 52, NO. 20: 2588–2596.
- Saha, S., Mina, B.L., Gopinath, K.A., Kundu, S., ve Gupta, H.S. 2008. Relative changes in phosphatase activities as influenced by source and application rate of organic composts in field crops. Bioresource Technology, 99(6), 1750–1757. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.049>
- Sainova, G. A., Kaliyeva, N. A., Yuldashbek, D. Kh., ve Akbasova, A. D. 2023. The Influence of Vermicompost and Various Concentrations of Lead on the Enzymatic Activity of Sierozem Soils of Kazakhstan. Scientifica, Article ID 8490234. <https://doi.org/10.1155/2023/8490234>
- Sample, E. C., Soper, R. J., ve Racz, G. J. 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In F. E. Khasawneh et al. (Eds.), The Role of Phosphorus in Agriculture (pp. 263–310). American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2134/1980.roleofphosphorus.c12>
- Sander, D., Penas, E. ve Walters, D., 1991. Winter wheat phosphorus fertilization as influenced by glacial till and loess soils, Soil Science Society of America Journal, 55 (5) 1474-1479.
- Sander, D.H., Penas, E.J. ve Eghball, B., 1990. Residual Effects of Various Phosphorus Application Methods on Winter-Wheat and Grain-Sorghum, Soil Science Society of America Journal, 54 (5) 1473-1478.
- Sarfraz, R., Yang, W., Wang, S., Zhou, B., ve Xing, S. 2020. Short term effects of biochar with different particle sizes on phosphorous availability and microbial communities. Chemosphere, 256, 126862. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126862>
- Sarkhot, D. V., Ghezzehei, T. A., ve Berhe, A. A. 2012. Impact of Biochar Enriched with Dairy Manure Effluent on Carbon and Nitrogen Dynamics. Journal of Environmental Quality. 41, 1107–1114. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0123>
- Sarkhot, D. V., Ghezzehei, T. A., ve Berhe, A. A., 2013. Biochar for nutrient recapture from dairy wastewater: recovery of major nutrients, J. Environ. Qual., 42, 1545–1554.
- Savini, I., Vanlauwe, B., Coyne, D., ve Six, J. 2016. Long-term effects of Minjingu phosphate rock and triple superphosphate on maize, bean, and soybean yields in

- Western Kenya. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 105(3), 333–346.  
<https://doi.org/10.1007/s10705-016-9811-4>
- Schachtman, D. P., Reid, R. J., ve Ayling, S. M. 1998. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. *Plant Physiology*, 116(2), 447–453.
- Schwartz, R.C., Dao, T.H. ve Bell, J.M., 2011. Manure and Mineral Fertilizer Effects on Seasonal Dynamics of Bioactive Soil Phosphorus Fractions. *Journal of Agronomy, Soils and Environmental Quality*. 103 (6), 1724-1733.
- Shaaban, M., Wu, Y., Núñez-Delgado, A., Kuzyakov, Y., Peng, Q.-A., Lin, S., ve Hu, R. 2023. Enzyme activities and organic matter mineralization in response to application of gypsum, manure and rice straw in saline and sodic soils. *Environmental Research*, 224, 115393.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115393>
- Sharma, M., Rana, M., Sharma, P. ve Das, S.K., 2016. Effect of different organic substrates and plant botanicals on growth and flowering of chinchinchee (*Ornithogalum thyrsoides* Jacq). *Indian journal of hill farming* 29 (2) 72–74
- Sharpley, A. N. 1995. Soil phosphorus dynamics: Agronomic and environmental impacts. *Ecological Engineering*, 5(2-3), 261–279.
- Sharpley, A. N. 1996. Availability of residual phosphorus in manured soils. *Soil Science Society of America Journal*, 60(5), 1459–1466.
- Shepherd, M.A. ve Withers, P.J., 1999. Applications of poultry litter and triple superphosphate fertilizer to a sandy soil: effects on soil phosphorus status and profile distribution. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 54: 233–242.
- Shi, Y., Ziadi, N., Hamel, C., Bélanger, G., Abdi, D., Lajeunesse, J., Lafond, J., ve Shang, J. 2020. Soil microbial biomass, activity and community structure as affected by mineral phosphorus fertilization in grasslands. *Applied Soil Ecology*, 146, 103391. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103391>
- Shorrocks, V. M. 1997. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil*, 193(1–2), 121–148.
- Sikdar, A., Wang, J., Hasanuzzaman, M., Liu, X., Feng, S., Roy, R., Sial, T. A., Lahori, A. H., Arockiam Jayasundar, P. G. S., ve Wang, X. 2020. Phytostabilization of Pb-Zn Mine Tailings with *Amorpha fruticosa* Aided by Organic Amendments and Triple Superphosphate. *Molecules*, 25(7), 1617.  
<https://doi.org/10.3390/molecules25071617>
- Sims, A. L., Fabrizzi, K. P., Kaise, D. E., Rosen, C. J., Vetsch, J. A., Strock, J. S., Lamb, J. A. Ve Farmaha, B. S., 2023. Soil phosphorus balance in Minnesota soils and its effects on soil test phosphorus and soil phosphorus fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 87:918–931. DOI: 10.1002/saj2.20549

- Six, J., Contant, R. T., Paul, E. A., ve Paustian, K., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Soltanpour, P.N. ve Workman, S.M., 1981. Use of Inductively-Coupled Plasma Spectroscopy for the Simultaneous Determination of Macro and Micro Nutrients in  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ -DTPA Extracts of Soils. In Barnes R.M. *Developments in Atomic Plasma Analysis*, USA, pp. 673-680.
- Sparks, D. L. (2003). *Chemistry of Soil Organic Matter*. Environmental Soil Chemistry, 53-80. Academic Press.
- Sposito, G. 2008. *The Chemistry of Soils* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Stevenson, F. J. 1995. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions* (2nd ed.). Wiley.
- Sun, H., Min, J., Zhang, H., Feng, Y., Lu, K., Shi, W., Yu, M. ve Li, X., 2018. Biochar application mode influences nitrogen leaching and  $\text{NH}_3$  volatilization losses in a rice paddy soil irrigated with N-rich wastewater. *Environ. Technol.* 2018, 39: 2090–2096.
- Sun, X., Gao, W., Li, H., Zhang, J., Cai, A., Xu, M., ve Hao, X. 2024. Animal manures increased maize yield by promoting microbial activities and inorganic phosphorus transformation in reclaimed soil aggregates. *Applied Soil Ecology*, 198, 105352. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105352>
- Syers, J. K., Johnston, A. E., ve Curtin, D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO*.
- Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., ve Zuberer, D. A. 2005. *Principles and Applications of Soil Microbiology* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Şahin, Ö., Taşkın, M.B., Kaya E.C. ve Taşkın H., 2016. Fosfor ile Zenginleştirilmiş Biyokömürün Marul Bitkisinin (*Lactucasativa* L. cv. Maritima) Gelişimi ve Mineral Element Konsantrasyonu Üzerine Etkisi. *Çukurova Tarım Gıda Bil. Der.* 31 (3) 101-107, 2016 (Özel Sayı).
- Şimşek Erşahin Y., 2007. Vermikompost ürünlerinin eldesi ve tarımsal üretimde kullanım alternatifleri. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 24(2): 99-107.
- Tabachnick ve Fidell, 2013 B.G. Tabachnick, L.S. Fidell *Using Multivariate Statistics* (sixth ed.) Pearson, Boston (2013).

- Tabatabai, M. A. 1994. Soil enzymes. Pages 775-833 in R.W. Weaver, S. Angle, P. Bottomley, D. Bezdicsek, S. Smith, A. Tabatabai, and A. Wollum, editors. Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties. Soil Science Society of America, Segoe, Wisconsin, USA.
- Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T. J., Condron, L. M., Sherlock, R. R., Anderson, C. R., ve Craigie, R. A. 2011. Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches. *Journal of Environmental Quality*, 40(2), 468–476. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0204>
- Tamer, N., Başalma, D., Türkmen, C. ve Namlı, A., 2021. Organik toprak düzenleyicilerin toprak parametreleri ve ayıııeği (*Helianthus annuus* L.) bitkisinin verim ve verim öğeleri üzerine etkileri. / Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi 4 (1) 11 – 21.
- Tarakııoğlu, C., 2008. Ham fosfat ve triple süperfosfat uygulamalarının fındığın verim ve bazı bitki besin maddesi iıerikleri üzerine etkisi.4. Ulusal Bitki Besleme ve Gübre Kongresi Bildiriler Kitabı, 769-776s.
- Tejada, M., ve Benítez, C. 2006. Organic amendment based on fresh and composted beet vinasse: Influence on soil properties and wheat yield. *Soil Science Society of America Journal*, 70(3), 900–908. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0163>
- Tejada, M., ve Gonzlez, J. L. 2005. Beet vinasse applied to wheat under dryland conditions affects soil properties and yield. *European Journal of Agronomy*, 23(4), 336–347.
- Tejada, M., González, J. L., Garcia-Martinez, A. M., ve Parrado, J., 2007. Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties. *Bioresource Technology*, 98(13), 2433–2441.
- Thies, J. E., Rillig, M. C., ve Graber, E. R. 2015. Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota. *Biochar for Environmental Management* (2nd ed., pp. 327–389). Routledge.
- Tian, J., Kuang, X., Tang, M., Chen, X., Huang, F., Cai, Y., ve Cai, K. 2021. Biochar application under low phosphorus input promotes soil organic phosphorus mineralization by shifting bacterial phoD gene community composition. *Science of the Total Environment*, 779, 146556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146556>
- Tiwari, R., Dwivedi, B.S., Sharma, Y.M., Thakur, R., Sharma, A., ve Nagwanshi, A. 2023. Soil Properties and Soybean Yield as Influenced by Long Term Fertilizer and Organic Manure Application in a Vertisol under Soybean-Wheat Cropping Sequence. *Legume Research – An International Journal*. <https://doi.org/10.18805/LR-5111>

- Toor, M. D., Kizilkaya, R., Anwar, A., Koleva, L., ve Eldesoky, G. E. 2023. Effects of vermicompost on soil microbiological properties in lettuce rhizosphere: An environmentally friendly approach for sustainable green future. *Environmental Research*, 243, 117737. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117737>
- Toor, M.D., Ay, A., Ullah, I., Demirkaya, S., Kızılkaya, R., Mihoub, A., Zia, A., Jamal, A., Ghfar, A.A., Di Serio, A., ve Ronga, D. 2024. Vermicompost Rate Effects on Soil Fertility and Morpho-Physio-Biochemical Traits of Lettuce. *Horticulturae*, 10(4), 418. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040418>
- Toprak, S. 2022. Fosforca Zenginleştirilmiş Organomineral Gübrelerin Kireçli Bir Toprakta Buğday Üzerine Etkisi. Doktora Tezi, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi.
- Trabelsi, D., Cherni, A., Zineb, A. B., Dhane, S. F., ve Mhamdi, R. 2017. Fertilization of *Phaseolus vulgaris* with the Tunisian rock phosphate affects richness and structure of rhizosphere bacterial communities. *Applied Soil Ecology*, 114, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.02.010>
- Turner, B. L., ve Haygarth, P. M. 2005. Phosphatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity. *Science of The Total Environment*, 344(1–3), 27–36.
- Upchurch, D.R., McMichael, B.L. ve Taylor, H.M. 1988. Use of minirhizotrons to characterize root system orientation. *Soil Science Society of America Journal*, 52:2, 319-323.
- Ülgen, N. ve Yurtsever, N., 1988. Türkiye Gübre ve Gübreleme Rehberi. Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları Genel Yayın No: 151, Teknik Yayınlar No: T-59, Ankara.
- Ünlü, H. ve Padem, H., 2010. Organik Domates Yetiştiriciliğinde Ahır Gübresi, Mikrobiyal Gübre ve Bitki Aktivatörü Kullanımının Yaprakların Makro Element İçeriği Üzerine Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 5 (2) 63-73, 2010 ISSN 1304-9984, Araştırma Makalesi.
- Van Straaten, P. 2002. Rocks for crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa. International Centre for Research in Agroforestry.
- Velasco-Sánchez, Á., Bennegadi-Laurent, N., Trinsoutrot-Gattin, I., van Groenigen, J. W., ve Moinet, G. Y. K. 2023. Soil microorganisms increase Olsen phosphorus from poorly soluble organic phosphate: A soil incubation study. *Soil Use and Management*. <https://doi.org/10.1111/sum.12960>
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M. ve Daifas, I., 2010. Biochar Application to Soils, A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions.

- Verma, S., Subehia, S.K. ve Sharma, S.P., 2005. Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers. *Biol Fertil Soils* (2005) 41: 295–300.
- Vurgun, E. ve Müftüoğlu, N.M., 2019. Bitkinin fosfor alımına vermikompost ve farklı fosfor dozlarının birlikte etkisi. *Mediterranean Agricultural Sciences* (2019) 32 (3) 437-441.
- Walker, T.W. ve Adams, A.F.R. 1958. Studies on soil organic matter: I. Influence of Phosphorus content of parent materials on accumulation of carbon, nitrogen, sulphur and organic phosphorus in grassland soils. *Soil Sci.* 85: 4307-318.
- Walkley, A. ve Black, L.A., 1934. An examination of the Degtjaref method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wang, H., Zhang, Y., Xiangmin, R., Fei, J., Peng, J., ve Luo, G. 2023. Coupling amendment of biochar and organic fertilizers increases maize yield and phosphorus uptake by regulating soil phosphatase activity and phosphorus-acquiring microbiota. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 355, 108582. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108582>
- Wang, Q., Duan, C., Geng, Z., ve Xu, C. 2024. Keystone taxa of phoD-harboring bacteria mediate alkaline phosphatase activity during biochar remediation of Cd-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 906, 167726. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167726>
- Wang, Y., Li, Y., Liu, Z., ve Zhang, J. 2022. Phosphorus supply increases nitrogen transformation rates and retention in soil: A global synthesis. *Earth's Future*, 10(3), e2021EF002583.
- Wang, Y., Zhang, Y., Zhao, H., Hu, W., Zhang, H., Zhou, X., ve Luo, G. 2022. The effectiveness of reed-biochar in mitigating phosphorus losses and enhancing microbially-driven phosphorus dynamics in paddy soil. *Journal of Environmental Management*, 314, 115087. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115087>
- White, P. J., ve Broadley, M. R. 2003. Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487–511. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg164>
- Wierzbowska, J., Sienkiewicz, S., Zalewska, M., Zarczynski, P. Ve Krzebietke, S., 2020. Phosphorus fractions in soil fertilised with organic waste. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 315. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8190-9>
- Wu, Q., Zhang, J., Liu, X., Chang, T., Wang, Q., Shaghaleh, H., ve Alhaj Hamoud, Y. 2023. Effects of biochar and vermicompost on microorganisms and enzymatic

- activities in greenhouse soil. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1060277. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1060277>
- Xu, G., Lv, Y., Sun, J., Shao, H., ve Wei, L. 2014. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications. *Clean – Soil, Air, Water*, 42(10), 1351–1357.
- Yağanoğlu, E., ve Aydın, A. 2024. The effect of organic and chemical fertilizers on the activity of soil enzymes in soils of different compositions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 48(1), 116–128. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3167>
- Yağmur, B., ve Okur, B., 2018. Bazı Doğal Toprak Düzenleyicilerin Mısır (*Zea Mays* L.) Bitkisinin Verim Parametreleri Üzerine Etkileri. *Ege Üniv. Ziraat Fak. Derg.*, 2018, 55 (4) 471-477.
- Yaman, K. ve Olhan, E., 2011. Arıtma Çamuru Kullanımının Buğdayın Verim, Fiziki Girdi ve Maliyetleri Üzerindeki Etkisi. *Tarım Bilimleri Dergisi – Journal of Agricultural Sciences*. 17 (2011) 157-166.
- Yang, X., Clarke, R., Grant, C., ve Cade-Menun, B. 2024. Soil phosphorus sorption capacity and aluminum influence: Evidence from 747 Irish soils using Langmuir isotherms. *Journal of Soils and Sediments*. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03900-z>
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., ve Zimmerman, A. R. 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 83(4), 1467–1471. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002>
- Yerli, C. 2023. Influences of farmyard manure and its biochars prepared at different temperatures on soil properties and soil enzymes and CO<sub>2</sub> emission from soil under irrigation conditions with treated wastewater. *Water, Air, ve Soil Pollution*, 234, 59. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06085-2>
- Yeşil Mütabakat Eylem Planı Genelgesi, 2021. Resmi Gazete. Sayı: 31543.
- Yeşil Mütabakat Eylem Planı, 2021. Yeşil Mütabakat Bildirisi. Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı.
- Yıldırım, Ö.F., 2010. Adıyaman kuyulu meralarında farklı dozlarda ahır ve fosforlu gübrelemenin meraya etkisi. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Tarla Bitkileri Anabilim Dalı
- Yin, Q., Zhang, B., Wang, R., ve Zhao, Z., 2017. Biochar as an adsorbent for inorganic nitrogen and phosphorus removal from water: a review. *Environ Sci Pollut Res* 24, 26297–26309. DOI: 10.1007/s11356-017-0338-y

- Yu, W., Ding, X., Li, S., Liao, X. ve Wang, R., 2013. Effects of organic-matter application on phosphorus adsorption of three soil parent materials. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. Vol:13, No:4 Temuco dic. 2013.
- Yuan, J. H., ve Xu, R. K. 2011. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, 27(1), 110–115. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00317.x>
- Yurtseven, B., 2019. Ham fosfat ve farklı organik gübre uygulamalarının mısır bitkisinin gelişimi ile bazı bitki besin maddesi içerikleri üzerine etkisi. Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhao, X. Y., Zhang, Z. Y., Huang, Y. M., ve Feng, F. J. 2023. Enhancing the effect of biochar ageing on reducing cadmium accumulation in *Medicago sativa* L. *Science of the Total Environment*, 862, 160690. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160690>
- Zhang, F., Wang, R., Yu, W., Liang, J., ve Liao, X., 2020. Influence of vermicompost application on phosphorus transformation and microbial activity in paddy soil. *Soil & Water Research*, 15(4), 199–210. <https://doi.org/10.17221/91/2019-SWR>
- Zhang, H., Chen, C., Gray, E.M., Boyd, S.E., Yang, H. Ve Zhang, D. 2016. Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: A phosphate adsorbent and a source of available phosphorus. *Geoderma*. 276, 1-6.
- Zhu, L., Wei, Z., Yang, T., Zhao, X., Dang, Q., Chen, X., Wu, J., Zhao, Y. 2020. Core microorganisms promote the transformation of DOM fractions with different molecular weights to improve the stability during composting. *Bioresource Technology*, 299, 122575.
- Zhu, L.-X., Xiao, Q., Cheng, H.-Y., Shi, B.-J., Shen, Y.-F., ve Li, S.-Q. 2017. Seasonal dynamics of soil microbial activity after biochar addition in a dryland maize field in North-Western China. *Ecological Engineering*, 104, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.026>

## ÖZGEÇMİŞ

