



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANA BİLİM DALI

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**FOSFOR VE KÜKÜRT EKSİKLİĞİ KOŞULLARINDA
YETİŞTİRİLEN BUĞDAY BİTKİSİNE FOSFOR VE KÜKÜRT
UYGULAMALARININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FURKAN KADIOĞLU

Danışman: Doç. Dr. Halil ERDEM

**TOKAT
MAYIS - 2022
Her Hakkı Saklıdır.**

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Halil ERDEM danışmanlığında hazırlamış olduğum “Fosfor Ve Kükürt Eksikliği Koşullarında Yetiştirilen Buğday Bitkisine Fosfor Ve Kükürt Uygulamalarının Etkisi” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

...../...../.....
Furkan KADIOĞLU



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın başlangıcından bitimine kadar her aşamasında yardımlarını esirgemeyen bilgi ve tecrübeleri ile daima yol gösteren saygı değer hocam Doç. Dr. Halil ERDEM'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında her zaman yanımda olan değerli aileme de teşekkürlerimi sunarım.

Furkan KADIOĞLU



ÖZET
FOSFOR VE KÜKÜRT EKSİKLİĞİ KOŞULLARINDA YETİŞTİRİLEN BUĞDAY
BİTKİSİNE FOSFOR VE KÜKÜRT UYGULAMALARININ ETKİSİ

Kadioğlu, Furkan
Yüksek Lisans, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Halil ERDEM
Mayıs 2022, viii + 35 sayfa

Fosfor (P) ve kükürt (S) bitkilerde verim ve kalite için önemli birer elementtir. Bu tez çalışmasında P ve S eksikliğine sahip bir toprağa sera koşullarında artan dozlarda S ve P uygulamalarının ekmeklik (Adana-99) buğdayın yeşil aksam kuru madde verimi, SPAD değeri ile yeşil aksam S, P ve N konsantrasyonlarına olan etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre toprağa artan dozlarda S ve P uygulamaları ile buğday bitkisinin yeşil aksam kuru madde verimi, SPAD değeri ile S, P ve N konsantrasyonlarında istatistiksel ($p<0.05$) olarak önemli artışa neden olmuştur. Kükürt ve P noksanlığı koşullarında $0.15 \text{ g bitki}^{-1}$ olan yeşil aksam kuru madde verimi P ve S uygulamalarının 100 mg kg^{-1} olduğu dozda %486.6 düzeyinde artışa neden olarak $0.88 \text{ g bitki}^{-1}$ 'ye çıkmıştır. Toprakta S ve P uygulama dozlarının oransal artışına paralel olarak bitkinin yeşil aksam kuru madde verimleri, S, P ve N konsantrasyonları da artmıştır. Sonuçlar bize P'un $50 \text{ ve } 100 \text{ mg kg}^{-1}$, S'in ise $25 \text{ ve } 50 \text{ mg kg}^{-1}$ dozlarının buğday bitkisinin kuru madde verim ile birlikte S, P ve N konsantrasyonlarının artışı için ideal dozlar olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Kükürt, Fosfor, Verim, Azot, Spad değeri, Buğday

ABSTRACT

THE EFFECT OF PHOSPHORUS AND SULFUR APPLICATIONS ON WHEAT PLANT GROWN IN PHOSPHORUS AND SULFUR DEFICIENCY CONDITIONS

Kadioğlu, Furkan

Master's Thesis, Department Of Soil Science And Plant Nutrition

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Halil ERDEM

May 2022, viii + 35 page

Phosphorus (P) and sulfur (S) are important elements for yield and quality in plants. In this thesis, the effects of increasing doses of S and P applications on a P and S deficient soil under greenhouse conditions on green component dry matter yield, SPAD value and green component S, P and N concentrations of bread (Adana-99) wheat were investigated. According to the results obtained, increasing doses of S and P applications to the soil caused a statistically ($p < 0.05$) significant increase in the green part dry matter yield, SPAD value and S, P and N concentrations of the wheat plant. Under the conditions of S and P deficiency, green party dry matter yield, which was $0.15 \text{ g plant}^{-1}$, increased to $0.88 \text{ g plant}^{-1}$, causing an increase of 486.6% at the dose of 100 mg kg^{-1} P and S applications. In parallel with the proportional increase in the S and P application doses from the soil, green part dry matter yields, S, P and N concentrations of the plant also increased. The results have shown us that 50 and 100 mg kg^{-1} of P and 25 and 50 mg kg^{-1} of S are ideal doses for the increase of S, P and N concentrations along with the dry matter yield of the bread wheat.

Keywords: Sulphur, Phosphorus, Yield, Nitrogen, Spad value, Wheat

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1. Denemede kullanılan toprağın bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	14
Çizelge 2. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın SPAD düzeyine olan etkisi.....	18
Çizelge 3. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın yeşil aksam kuru madde verimine olan etkisi.....	20
Çizelge 4. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın yeşil aksam P konsantrasyonuna (%) olan etkisi.....	22
Çizelge 5. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın yeşil aksam S konsantrasyonuna (%) olan etkisi.....	23
Çizelge 6. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın yeşil aksam N konsantrasyonuna (%) olan etkisi.....	24

KISALTMALAR VE SİMGELER

KISALTMA

S
N
P
K
Fe
Al
Ca
Mn
Zn
Cu
CaCO₃
So₄
KNO₃
DTPA
P₂O₅
NaHCO₃
ATP
ADP
pH

AÇIKLAMA

Kükürt
Azot
Fosfor
Potasyum
Demir
Alüminyum
Kalsiyum
Mangan
Çinko
Bakır
Kalsiyum karbonat (kireç taşı)
Sülfat iyonu
Potasyum nitrat
Dietilentriaminpentaasetik asit
Fosfor pentaoksit
Sodyum bikarbonat
Adenosin-trifosfat
Adenosin-difosfat
Asitlik – Alkalilik Faktörü

SİMGELER

-
%
/
<
>
g
kg
ha
mg
mm
ppm
mg kg⁻¹

AÇIKLAMA

Eksi
Yüzde
Bölü
Küçüktür
Büyüktür
Gram
Kilogram
Hektar
Miligram
Milimetre
Milyonda bir parça
ppm (milyonda bir parça)

İçindekiler

ETİK SÖZLEŞME.....	i
JÜRİ KABUL ve ONAY.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
ÖZET (TÜRKÇE).....	iv
ABSTRACT (İNGİLİZCE).....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMALAR ve SİMGELER LİSTESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
2.1. Fosfor (P)	4
2.1. Kükürt (S).....	9
3. MATERYAL ve METOD	14
3.1. Materyal	14
3.1.1. Sera denemelerinde kullanılan toprak	14
3.1.2. Sera denemesinde kullanılan bitki materyali	15
3.2. Metod	15
3.2.1. Sera denemesinin kurulması ve yürütülmesi	15
3.2.2. Bitki analizleri	16
3.2.3. Toprak analizleri	16
3.2.4. İstatistik analizleri	17
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	18
4.1. Artan Dozlarda P ve S Uygulamalarının Ekmeklik Buğdayın Spad Düzeyi ile Kuru Madde Verimine Etkisi	18
4.2. Artan Dozlarda P ve S Uygulamalarının Ekmeklik Buğdayın Yeşil Aksam P, S ve N Konsantrasyonlarına Etkisi	22
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	26
6. KAYNAKÇA.....	28
7. ÖZGEÇMİŞ	35

1. GİRİŞ

Buğday dünyada 210 milyon hektar alanda üretimi yapılan, insanlar için başlıca besin kaynağı olan bir kültür bitkisidir. Ülkemizde buğday üretimi yapılan alan 8 milyon hektardır. Türkiye, buğday üretiminde başı çeken ülkeler arasında olup 10 ülke içerisinde %3,5'lik bir paya sahiptir (Anonim, 2018). Türkiye'de buğday üretiminin görüldüğü bölgeler Doğu Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Orta Anadolu'dur. Kurak ve yarı kurak ilkimin hâkim olduğu bu bölgelerde halkın temel geçim kaynağını oluşturur. Buğdayın hem insanlar için hem de hayvanlar için önemli bir besin kaynağı olması sebebiyle (Kordali ve Zengin, 2011) Türkiye'de ekim alanı açısından en büyük paya sahip olan bitkidir (Anonim, 2018).

Bitkisel üretimde meydana gelen stres, bitkinin tüm yapısını, büyüme, gelişme ve verimliliği düşüren faktör veya faktörler olarak tanımlanabilir. Bu etmenler biyotik ve abiyotik olarak ikiye ayrılabilir. Hastalıklar, zararlılar, tuzluluk, kuraklık, düşük ve çok yüksek sıcaklıklar, besin elementlerindeki eksiklik veya fazlalık (toksisite etkisi) olarak sıralayabiliriz. Bu etmenler arasında besin elementlerinin gerekli oranda verilmemesi veya fazla verilmesi, bitkinin büyüme, gelişme, ürün verimliliği ve ürün kalitesini direkt olarak etkiler. Besin elementlerinin optimum düzeyde verilmemesi bu açıdan önemli bir stres kaynağıdır (Calanca P.P., 2017). Bitkilerin besin elementleri ile yeteri kadar beslenememesi, hastalık ve zararlılara, yabancı otlara karşı hayatta kalıp mücadele etmelerine, sıcaklık, kuraklık ve soğuk gibi stres faktörlerine karşı dirençlerini düşürür. Ekonomik öneme sahip kültür bitkilerinde beslenme ürün verimini ve kalitesini direkt olarak etkilemektedir (Yadav ve ark., 2020).

Ülkemiz tarım topraklarında noksanlığı en çok karşılaşılan elementlerin başında azot ikinci sırada ise fosfor gelmektedir. Bitkiler için çok önemli bir element olan P bir çok enzim, nükleik asitler ile fosfolipidlerin yapısında yer almakta ve ATP ile ilgili olan tüm reaksiyonlarda görev alan bir elementtir. Türkiye topraklarının büyük bir bölümünde kireç ve pH'nın yüksekliği, organik maddenin yetersizliği P yarayışlılığının önemli derecede azalmasına neden olmaktadır.

Yapılan bir çalışmaya göre Türkiye topraklarının %82'inde pH 7.0 ve üzerinde, %90'ında organik madde %2-3'ün altındadır. Bitkilerce alınabilir P miktarı ise NaHCO_3 ile ekstrakte edilebilir P yöntemine göre %58'inde yetersiz ($<6 \text{ kg P}_2\text{O}_5$) düzeyde olduğu bildirilmiştir (Eyüpoğlu, 1999). Toprakta yarayışlı fosforun çok düşük olduğu durumlarda, total P konsantrasyonları çok yüksek çıkabilmektedir. Bu durum yarayışlı P konsantrasyonlarının yüksek pH'lı topraklarda $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, düşük pH'lı topraklarda ise $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$, $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ şeklinde fiksasyona maruz kalmasından kaynaklanmaktadır (Gupta ve ark., 2020). Tarım topraklarında P noksanlığına karşı toprağa gübre olarak uygulanan P'un fiksasyona uğraması nedeniyle, yüksek oranda fosfor içeren gübrelerin uygulanması ekonomik açıdan yüksek maliyete, çevre açısından ise toprak ve su kirliliğine neden olmaktadır. Tarım topraklarına uygulanan gübre fosforunun yalnızca %10-20'sini bitkiler kullanılabilmektedir (Holford 1997; Gupta ve ark., 2020).

Bitkiler tarafından fosfor kadar ihtiyaç duyulan ve bitkilerde birçok görevi bulunan kükürt (S), bitkiler için önemli bir element olmasına karşın günümüze kadar bu element ile ilgili yapılmış çalışma sayısı azdır. Bunun sebebi ise, yağışlarla atmosferden ve gübrelemeyle toprağa yeterli düzeyde S girişinin olması olarak gösterilmektedir (Zhao ve ark., 1996). Buna karşın günümüzde dünyanın tarım yapılan toprakların birçoğunda kükürt noksanlığı sorununun olduğu bildirilmiştir. Bu durumun nedeninin ise: (a) özellikle kükürt içermeyen ya da çok düşük düzeyde kükürt içeren gübrelerin kullanımının artması, (b) organik atık (ahır gübresi, kompost vb) uygulamalar yapılan topraklara çok düşük düzeyde S girişinin olması, (c) topraktan diğer çeşitlere göre fazla miktarda besin elementi kaldıran çeşitlerin ıslah edilerek üretimde kullanılması ve tarımsal faaliyetin yoğunluğu, (d) kükürtlü mantar ilaçların kullanımının azalması ve (e) çevresel önlemler kapsamında atmosferik S'ün emisyonlarının azaltılması olarak gösterilmiştir (Camberato ve Casteel, 2017). Kükürt bitkiler için çok önemli bir makro bitki besin elementidir. Bitkisel üretimde verim ve kalite üzerine olan pozitif etkisinin yanında S bitkilerde sistin, sistein, methionin gibi aminoasitlerin, çok sayıda koenzim, tioredoksinler ile sülfolipidlerin sentezinde ve yapısında yer almaktadır (Marschner, 2011).

Yetiştirme ortamında S noksan olduğu durumlarda bitkilerde verim ve kalite olağanüstü düzeyde azalmakta, protein sentezi gerilemeye ve S içeren sistin, sistein ve methionin gibi amino asitlerin içeriğinde ise önemli oranda azalmaya neden olmaktadır (Marschner, 2011; Chahal ve ark., 2020).

Buğdayda S noksanlığı, buğdayın tanesindeki protein ve amino asitlerin konsantrasyonlarını azaltmakta ve buğday ununun ekmek yapabilme özelliklerini kötüleştirmektedir (Haneklaus ve ark., 1995; Raffan ve ark., 2020).

Bu tez çalışmasında, fosfor ve kükürt eksikliğine sahip bir toprakta buğday bitkisine farklı dozlarda S ve P uygulamalarının buğdayın kuru madde verimi ve SPAD düzeyi ile yeşil aksamındaki S, P ve N konsantrasyonlarına etkisi araştırılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Fosfor (P)

Toprakların total P konsantrasyonları, ana materyale ve iklim özelliklerine göre 100 ile 3000 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir (Condon ve ark., 2005). Yapılan araştırmalarda toprakların bitkiye yarayışlı fosfor konsantrasyonlarının Alpaslan ve ark. (1998)'e göre 8-25 mg kg⁻¹; Torrent ve Delgado (2001)'a göre ise 10-15 mg kg⁻¹ arasında bulunduğu bitkiler için yeterli olabileceği bildirilmiştir. Toprakta fosfor organik ve inorganik formlarda bulunmakta ve bu fosforun yaklaşık %35-80 kadarının organik P olduğu, hatta organik maddece zengin topraklarda bu değerin %90'a kadar çıktığı bildirilmiştir (Condon ve ark., 2005). Topraklar arasında toplam fosfor konsantrasyonları bakımından büyük farklılıklar bulunmakta ve bu farkın toprakların oluştuğu ana materyalden kaynaklandığı bildirilmiştir (Marschner ve ark., 1997). Özellikle kireç taşı, marn ve benzer ana materyallerden oluşmuş toprakların toplam fosfor içerikleri asit ya da kireçli olmayan ana materyallerden oluşmuş toprakların toplam fosfor içeriklerine göre daha yüksektir. Bunun sebebi, kireçli ana materyallerde bulunan kalsiyum karbonatın orijininin kalsiyum ve fosfor bakımından zengin, sucul canlıların kalıntıları, iskelet ve kabuklarından meydana gelmesidir (Stewart ve Tiessen, 1987; Magid ve ark., 1996).

Toprak çözeltisindeki inorganik P'a göre yüksek düzeyde bulunan organik P'dan bitkilerin doğrudan yararlanması çok zordur. Bu sebepten dolayı bitkiler organik P kaynaklarını kullanabilmek için bazı mekanizmalar geliştirmişlerdir. Bu mekanizmalar arasında yer alan ve kökler tarafından salgılanan, topraktaki organik P'u hidrolize ederek inorganik P formlarına dönüştürerek bitkilerin yararlanacağı forma dönüştüren fosfataz enzimidir (Nannipieri ve ark., 2011; Margalef ve ark., 2021). Bitkiler gibi toprakta yaşayan mikroorganizmalarda, fosfataz salgılamaları sonucu toprak organik P'u inorganik P formlarına dönüştürmelerine katkıda bulunarak bitkilerin P ile beslenmelerine dolaylı olarak yardımcı olurlar (Prabhu ve ark., 2019).

İnorganik P, toprakta fosfat anyonları şeklinde toprak çözeltisinde, Fe ve Al oksitler, Al silikatlar ve CaCO_3 'lar şeklinde bulunurlar. Bununla beraber bazı durumlarda da pH'ya bağımlı olarak alkali topraklarda oldukça güç çözünen Ca-Fosfatlar ve asit karakterli topraklarda ise Al-Fosfat, Mn-Fosfat ve Fe-Fosfatlar şeklinde fikse edilmiş halde bulunur (Menezes-Blackburn ve ark., 2018; Mardamootoo ve ark., 2021). İnorganik P'un toprak çözeltisi içerisindeki konsantrasyonları toprak tekstürü, organik madde miktarı, toprak nemi ve sıcaklığı ile birlikte toprak pH'sı, kireç, oksitler ve hidroksitler ile yakın ilişki içerisinde (Gupta ve ark., 2020). Topraktaki bulunan P'un büyük bir bölümü çözünemez bileşikler şeklinde bulunmalarından dolayı total P'un ancak %1'den daha az miktarı bitkiler tarafından yararlanılabilir durumdadır. Yapılan araştırmalarda toprağa gübre halinde verilen P'un çok hızlı bir şekilde fiksasyona maruz kaldığı bildirilmiştir. Toprağa gübreleme yolu ile atılan P'un sadece %10-20 kadarı bitkiler tarafından alınabilmekte, geri kalan kısım ise pH'sı yüksek alkali topraklarda toprakta çözünürlüğü oldukça zor olan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ şeklinde, pH'sı düşük asit topraklarda ise $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ ve/veya $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ şeklinde fiksasyona uğrayarak yarayışsız yada az yarayışlı formlara dönüşmektedir (Manske ve ark., 2000).

Araştırmalar ülkemiz topraklarının total P içerikleri açısından yeterli olduğu ve hatta bazı bölgelerde ise çok yüksek P içeriklerine sahip olduğu bildirilmiştir (Kacar ve Katkat, 1997). Ancak bu sonuçlar, bitkilere yarayışlı P konsantrasyonu bakımından bize kesin bilgi vermemekte, sadece topraklardaki rezerv durumda bulunan ve bitkilerin sahip oldukları özelliklerine göre yararlanılabilir ve yararlanılamaz fraksiyonları temsil etmektedir. Buna karşılık, Türkiye topraklarının yarayışlı P konsantrasyonlarının belirlenmesi amacı ile, ülke genelindeki tarım alanlarından alınan toprak örnekleri Olsen yöntemine göre analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, Türkiye topraklarının bitkiye yarayışlı P konsantrasyonlarının %29.5'i çok az, %28.5'i az, %17'si orta, %15.7'si yüksek, %9.3'ü ise çok yüksek şeklinde bir dağılıma sahip olduğu bildirilmiştir (Eyüpoğlu, 1999). Araştırmalar, Türkiye topraklarının total P konsantrasyonu bakımından yeterli olmasına karşın, P'un topraktaki yarayışlılığını etkileyen toprağın fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, yarayışlı P konsantrasyonlarının çok az (%55.3) düzeylerde olduğu bildirilmiştir.

Bitkiler kökleri ile P'u genel olarak primer ortafosfat iyonu (H_2PO_4^-) formunda alırken, kireçli alkalın topraklarda daha çok sekonder ortafosfat iyonu (HPO_4^{2-}) formunda almaktadır. Genel olarak H_2PO_4^- ve HPO_4^{2-} formları arasında bitki köklerinin 10:1 düzeyinde oranlarda alım yaptığı bildirilmiştir. Ancak toprak çözeltisinde bulunan bu iki iyonun birbirlerine çok hızlı dönüştüklerinden dolayı 4 ile 8 arasında yer alan pH'ya sahip topraklarda bu iki iyonun bitkiler tarafından alımları arasındaki fark önemli değildir (Holford, 1997).

Bitkiler ihtiyaç duyduğu fosforun büyük bir kısmını kökleri ile toprak çözeltisinden ve çok az da olsa bir kısmını doğrudan toprağın katı fazından alırlar. Toprak çözeltisinde azalma eğilimi gösteren fosfor toprağın katı fazı tarafından toprak çözeltisine tamponlanır. Toprak çözeltisiyle toprağın katı fazı arasında diğer bitki besin elementlerinde olduğu gibi fosfor için de bir denge bulunmaktadır. Bu denge toprak çözeltisi aleyhine bozulduğunda ortamda yetişen bitkilerde P noksanlığı ortaya çıkar (Marschner ve ark., 1997).

Bitkilerin gelişmelerinin erken dönemlerinde kök bölgesinde P'un yeterli konsantrasyonlarda bulunması, bitkilerde üreme organlarının oluşmaya başlaması açısından çok önemlidir. Bitkilerde P, bitkilerin generatif organlarında fazla miktarda (tohum ve meyve) bulunmakta ve bu durum tohum gelişimi ve canlılığı için çok önemlidir (Raghothama, 2005). Tohum ve meyvelerde P, fosforun depo formu olan fitin şeklinde bulunmakta ve bu form tohumun çimlenmesi için çok önemli bir bileşik olan fitin metabolize edilir ve diğer fosfor formlarına dönüştürülür (Raboy ve ark., 2001).

Fosfor bitkiler için mutlak gerekli bir besin elementi olup, bitkilerde organik ve inorganik bileşikler şeklinde bulunmaktadır. Bitkilerin vejetatif büyüme dönemi içerisinde sağlıklı büyümesi için gerekli fosfor miktarı, bitki kuru madde ağırlığının yaklaşık % 0.3-0.5'ini oluşturmaktadır (Rausch and Bucher 2002; Marschner, 2011). Fosforun bitkideki en önemli görevi enerji depolama ve transferidir. Fosfor, bitkiler için çok önemli iki bileşik olan ADP (adenosindifosfat) ve ATP (adenosintrifosfat)'ın yapısında yer alarak merkezi element olarak görev yapar ve enerji transferini sağlar.

Fosforun bitkideki bu fonksiyonlarının yanında, fosfo-protein, fosfo-lipid, şeker fosfat, nükleik asit, koenzim ve nükleotidler gibi bitkiler için önemli olan birçok enzimin yapısında yer almaktadır (Vance ve ark., 2003).

Bitkilerde P noksanlığında bitkilerde gelişim durmakta, yaprak alanı küçülmekte buna bağlı olarak fotosentez azalmakta, bu da bitkilerin verimlerinde büyük düşüşlere neden olmaktadır (Rodriguez ve ark., 2000). Yapılan araştırmalarda fosfor ile yeterli beslenen bitkilerin yaprak alanı ile fosfor noksanlığı çeken bitkilerin yaprak alanları arasında %83 düzeyinde fark olduğu ve buna bağlı olarak fosfor noksanlığına sahip bitkilerde fotosentez oranının da % 50 düzeyinde azalmalar olduğu bildirilmiştir (Rodriguez ve ark., 2000).

Fosfor eksikliği koşullarında bitkilerde görülen belirtilerin nedeni tam olarak bilinmemekle beraber, birçok bitkide benzer simptomlar görülmektedir. Fosfor eksikliğinde bitkilerde ortaya çıkan bodur büyüme ile beraber, yaprak gelişimi, yaprak yüzey alanı ve yaprak sayısında önemli düzeyde azalmalar meydana gelmekte, bunun yanında yapraklar genellikle normalden daha koyu yeşil renkli bir hal almaktadır (Marschner ve ark., 1997). Noksanlık şiddetlendikçe bitkilerin yaprak ve gövdesinde kırmızı, kırmızımsı mor renk meydana gelmekte, oluşan kırmızı renk ise fosfor noksanlığında antosiyanin oluşumunun artmasından kaynaklanmaktadır (Atkinson, 1973; Hammond ve ark., 2004). Baklagil bitkisi olan fasulye ve bezelyede P noksanlığında yapraklar koyu yeşil ve mavimsi yeşil veya zeytuni yeşil renkli olurlar. Bitkilerin gövdesi ince ve kısa, gelişim ise kalmakta, bununla beraber çiçeklenme zayıftır ve tohum oluşumu ise azdır. (Hammond ve ark., 2004; Silva ve ark., 2014).

Fosfor eksikliğine karşı toleransı yüksek olan bitkiler, toprakta P'un yetersiz olduğu durumlarda morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler adaptasyon mekanizmaları geliştirebilmekte ve buna bağlı olarak da P noksanlığından minimum düzeyde etkilenmektedirler (Balemi ve Negisho, 2012; Lazali ve Drevon, 2021). Fosfor noksanlığına maruz kalan bitkiler, kök/yeşil aksam oranını artırarak noksanlığa karşı bitkilerin geliştirdikleri önemli bir mekanizmadır. Yapılan bir çalışmada, bitki köklerinin P alımında etkili olan en önemli bitkisel faktörler arasında köklerin büyüme hızı ile kök çapı olduğu bildirilmiştir (Barber ve Silberbush, 1984).

Mısır (Zhang ve ark., 2012), maş fasulyesi (Reddy ve ark., 2020), kolza, ıspanak ve domates (Föhse ve ark, 1991) gibi farklı bitki türlerinde fosfor noksanlığında kök uzaması ve ince kök oluşumunun arttığı bildirilmiştir. Bitkilerde P eksikliği durumlarında, ikincil bitki köklerinde dallanma ve lateral köklerin gelişimi ile toplam kök uzunluğunda artış olduğu bildirilmiştir (Hammond ve ark., 2004).

Farklı bitki tür ve çeşitlerinde, P eksikliğinin marul genotiplerinde kök ağırlığının (Bertossi ve ark., 2013), buğdaygillerde kök yoğunluğu (Nguyen ve Stangoulis, 2019) ve kılcak kök uzunluğunun (Singh ve ark., 1997), yerfıstığı genotiplerinde (Wissuwa ve Ae, 1999) ve tahıllarda (Gahoonia ve ark., 1999) kök tüyü gelişiminin P etkinliği ile pozitif ilişkili olduğu bildirilmiştir. Bitkiler arasında genetik farklılıklardan dolayı kök tüylerini daha iyi gelişen çeşitlerde, asit fosfataz enzim aktivitesinin yüksek olduğu bildirilmiştir. Bu nedenlerden dolayı, P eksikliği ile kılcak kök arasında P'un alınabilirliği bakımından önemli bir ilişki bulunmaktadır. Bunun yanında bitki kök tüylerinin toprakta bulunan organik ve inorganik fosfordan daha fazla yararlandıkları ve fosfor alımında kök tüylerinin önemli görevler üstlendiği bildirilmiştir (Wen ve ark., 2017). Bitkiler fosfordan daha fazla yararlanabilmek için özellikle kök morfolojilerinde değişiklik yaparak kök yüzey alanını, kök ağırlığını ve miktarını artırır (Stone ve ark., 2003; Wen ve ark., 2017).

Fosfor alımı ve etkinliği açısından (Inal A., 2001), makarnalık (Kundur-1949, Çakmak-79 ve Kızıltan-91) ve ekmeklik (Bezostaja-I, Gün-91 ve Gerek-79) buğday çeşitleri arasındaki farklılığı belirlemek üzere sera koşullarında bir çalışma yürütmüşlerdir. Araştırmacılar topraktan 0, 50, 100 ve 200 ppm dozlarında P uygulaması sonucu, ekmeklik buğday çeşitlerinin P konsantrasyonları ile P içeriklerinin, makarnalık buğday çeşitlerinden yüksek olduğunu ve buna bağlı olarak da ekmeklik buğdayların makarnalık buğday çeşitlerine göre topraktaki P'dan daha etkin yararlandığını bildirmişlerdir.

2.1. Kükürt (S)

Kükürt toprakta organik ve inorganik formda bulunmakta, ancak birçok toprakta temel S kaynağı olarak organik bağlı S yer almaktadır. Toprakların total S içeriğinin 100 ile 1000 mg kg⁻¹ aralığında değiştiği bildirilmiştir (Eriksen ve ark., 1998). Toprağın toplam S içeriğinin, toprağın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile iklim, bitki örtüsü, topoğrafya ve tarımsal uygulamalar olmak üzere birçok faktör tarafından etkilenmektedir. Sayılan bu faktörlere bağlı olarak toprakların toplam S konsantrasyonları 20-35000 mg kg⁻¹ arasında değişim göstermektedir (Eriksen ve ark., 1998; McGrath ve ark., 2003). Yağışlı bölgelerin tarım topraklarında toplam S konsantrasyonu 100-500 mg kg⁻¹ arasında değişmekte, bu değerlerin toprak işleme derinliğinde 225 ile 1120 kg ha⁻¹ arasında değiştiği bildirilmiştir (Stevenson ve Cole, 1999).

İklim özellikleri bakımından ılıman, humid ve yarı humid bölge topraklarının 0-30 cm derinliğindeki toplam S'ün % 90'dan fazlasını organik S oluşturmaktadır (Williams, 1967; Zhao ve ark., 1996). Buna karşın, sülfat yada sülfid ile tuzlu, asit sülfat ve jips bulunan toprakların total S'ün büyük bir bölümünü inorganik S meydana getirmektedir. Toprakta bulunan organik kökenli S genellikle organik maddeye bağlı şekilde bulunmakta ve miktarı ise toprak derinliği ile birlikte azalmaktadır (Freney, 1986).

Genellikle topraklarda inorganik S, organik bağlı S'e kıyasla topraklarda daha az bulunur. Sülfat en yaygın inorganik S formudur ve 1-toprak çözeltisindeki SO₄⁻², 2-adsorbe edilmiş SO₄⁻² ve 3-mineral S olarak üçe ayrılır (Eriksen ve ark., 1998).

Kükürt toprakta SO₄⁻² şeklinde Ca, Mg veya Na katyonları ile çökebilir. Bununla birlikte, topraklarda SO₄⁻² saf olmayan CaCO₃'la çökelmiş yada kristalize olmuş şekilde de görülebilir. Bu fraksiyon kireçli topraklardaki toplam S'ün önemli bir inorganik miktarını oluşturur (Tisdale ve ark., 1993). Bataklık alanlarda pirit gibi sülfid mineralleri büyük miktarlarda birikir. Bu alanlar kurutulduğunda (drenajından sonra) S'lü bileşikler SO₄⁻²'a okside olarak toprak pH'sında azalmaya neden olurlar. Toprak çözeltisinde SO₄⁻² katı fazda bulunan diğer formlar ile denge halindedir.

SO_4^{-2} toprakta kil minerallerine ve seski oksitlere fosfat formları kadar olmasa da kuvvetli bir şekilde adsorbe olmuş halde bulunurlar.

Toprak çözeltisindeki SO_4^{-2} konsantrasyonunun artışı aynı zamanda adsorbe edilen SO_4^{-2} miktarının da artışına neden olmaktadır (Eriksen ve ark., 1998).

Toprakta pH'ya bağlı çok fazla yük bulunmasından dolayı, SO_4^{-2} adsorpsiyonu denge çözeltisinin pH'sına bağlı olarak değişmektedir (Barton ve ark., 1994). Sülfat adsorpsiyonu pH'nın düşük olduğu topraklarda çok kuvvetli olmakta (Martini ve Mutters, 1984) ve bu nedenle SO_4^{-2} adsorpsiyonu ile toprak pH'sı arasında negatif bir ilişki bulunmaktadır. pH'nın 6.5'dan büyük olduğu topraklarda ise SO_4^{-2} adsorpsiyonunun önemsiz olduğu bildirilmiştir (Kparmwang ve ark., 1997).

Toprakta adsorbe edilmiş SO_4^{-2} 'ın bitkilerce devamlı şekilde alınabilir formda olmadığı durumlarda, SO_4^{-2} 'ın toprakta adsorpsiyonunu azaltacak veya toprak çözeltisindeki SO_4^{-2} 'ın konsantrasyonunu arttıracak uygulamalar ile toprakta SO_4^{-2} 'ın bitkilerce alınabilirliği artırılabilir (Scherer, 2001). Adsorbe edilen SO_4^{-2} 'ın yararlı hale gelmesi için yapılan bir çalışmada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in azar azar ilave edilmesi ile toprak pH'sının arttığı buna bağlı olarak da SO_4^{-2} 'ın bitkilerce alınabilirliği arttığı belirlenmiştir (Mehlich, 1964). Bu nedenle yeterli düzeyde kireçlenen toprakların yüzey horizonlarında daha düşük düzeylerde SO_4^{-2} adsorpsiyonu beklenmektedir (Wilhelm Scherer, 2009). Sonuç olarak kireç taşı gibi materyallerin uygulanması ile beraber SO_4^{-2} 'ın alınabilirliğinde bir artışa neden olduğu bildirilmiştir (Eriksen ve ark., 1998). Ayrıca yapılan bir çalışmada SO_4^{-2} 'ın kolaylıkla fosfat tarafından desorbe edildiği ve bu nedenle kireçleme dışında süper-fosfat uygulamaları da SO_4^{-2} adsorpsiyonunu azalttığı bildirilmiştir (Bornemisza ve Llanos, 1967).

Kükürt tüm canlı organizmalar için gerekli temel bir besin elementidir. Kükürt bitkilerde sistin, sistein, methioninin, birçok ko-enzimin (örneğin: biotin, co-enzim A, tiamin pirofosfat ve lipoik asit), tioredoksinlerin, sulfolipitlerin ve proteinlerin yapısında yer almaktadır. Kükürtün glutation ve tioredoksin gibi peptidlerin sentezinde, redoks reaksiyonlarında, protein yapısının dayanıklılığında ve disulfid bağının (S-S) oluşumunda da yaşamsal rolü vardır (Zhao ve ark., 1999). Bitkiler kükürdü kökleri vasıtası ile toprak çözeltisinden çoğunlukla SO_4^{-2} anyonu formunda almaktadır. Bu alım hücrenin plazma membranındaki proton taşıyıcı tarafından katalize edilmektedir (Hawkesford ve De Kok, 2006).

Kükürdün bitkide başlıca taşınım formu sülfattır (SO_4^{2-}), ancak kükürdün indirgenmiş bir S formu olan sistein olarak da taşınabildiği bildirilmiştir (Anderson, 1990; Leustek ve Saito, 1999).

Bitkilerin S ihtiyacı, bitkilerin türü ve gelişme dönemlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Turpgil ile zambakgillerin S gereksinimi yüksek, tahılların düşük, baklagillerin ise bunların arasında olduğu bildirilmiştir (Scherer, 2001). Yapılan bir çalışmada lahanagil bitkilerinin hektarda 60-70 kg S'e gereksinim duyduğu, buna karşın kanola bitkisinde 1 ton tohum elde etmek için yaklaşık 16 kg ha⁻¹ S gerekli olduğu bildirilmiştir (Blake-Kalff ve ark., 1998).

Lahanagillerin yüksek miktarda S'e gereksinim duymasının nedeni S içeren ikincil bir metabolit olan glukosinolatlarla ilişkili olduğu ve bu bileşiğin bitkide tat, aroma ve hastalıklara karşı dirençte önemli olduğu ve bitkinin vegetatif organlarındaki toplam S'ün %10'nun glukosinolat şeklinde olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte lahanagillerin dokusundaki toplam S'ün %50'den fazlası SO_4 şeklinde bulunmaktadır (Blake-Kalff ve ark., 1998; Mithen, 2006). Soğan ve pırasa gibi bitkilerin S ihtiyacı 30-40 kg ha⁻¹ düzeyindedir. Bu bitkiler S-alk(en)il-L-sistein sulfo-oksit gibi S içeren ikincil metabolitlere sahiptirler. Bu bileşikler enzimler tarafından parçalandığında karakteristik bir tat verirler (Mithen, 2006).

Yapılan bir çalışmada, S noksanlığına sahip bir toprakta kışlık buğdayın 1 ton dane verimi oluşturmaları için 2-3 kg S'e ihtiyaç gösterdiği bildirilmiştir (Zhao ve ark., 1995). Ekmeklik buğday çeşitleri, danelerinde ekmeklik olmayan çeşitlere göre %10 daha fazla S konsantrasyonuna sahip olduğu, bunun nedeninin ise ekmeklik buğday çeşitlerinin ekmeklik olmayan buğday çeşitlerine göre daha yüksek oranda protein içermesinden kaynaklanmaktadır.

Ekmeklik buğday çeşitlerinin danesinde makarnalık buğday çeşitlerinin danesinden daha fazla S bulunmasına rağmen, ekmeklik ve makarnalık buğday çeşitlerinin topraktan aldıkları toplam S alımları genellikle birbirlerine benzerdir. Bunun nedeninin ise, ekmeklik olmayan buğday çeşitlerinin daha fazla verim oluşturma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır (Zhao ve ark., 1995).

Bitkilerin kök, gövde, yaprak, meyve gibi farklı organlarında yer alan S'ün dağılımı da bitki türleri arasında farklıdır.

Örneğin soğanda bulunan toplam S'ün yaklaşık %80'i soğanın yumrusunda bulunurken, kolza tohumunda bu değerin %25 olduğu bildirilmiştir. Tahıllar ile baklagillerin tanelerindeki S'ün oranı toplam S'ün yaklaşık %50-60'ını oluşturmaktadır.

Bu veriler, topraktan alınan S miktarının bitkisel atıklar ile toprağa geriye dönen S miktarından daha fazla olduğunu göstermektedir (Chapman,1997).

Hasat artıklarının toprağa karıştırılmasının bir sonra yetiştirilecek bitkinin S'le beslenme düzeyini nasıl etkilediğini gösteren çalışmalar çok azdır. Sürekli buğday ekilen bir tarım arazisinde hasat artıklarının toprağa gömülmesinin bitkinin S'le beslenme düzeyini çok az etkilediği bulunmuştur.

Araştırmalar, sap-saman gibi bitki artıklarının C/S oranlarının çok yüksek olması nedeni ile mikrobiyal olarak S'ün toprakta immobilizasyonuna neden olduğu ve bu nedenle de hasat artıklarının kısa bir dönem için S'ün alınabilirliğini azaltabileceği bildirilmiştir (Islam, M. ve Dick, R. P. (1998)).

Bitkilerde kükürt noksanlığı ilk olarak genç yapraklarda görülür ve bunun nedeni ise S'ün yaşlı yapraklardan genç yapraklara hareketinin oldukça az olması ile açıklanmaktadır. Bitkilerin yaşlı yapraklarındaki çözünebilir olmayan S (örneğin protein S'ü) oldukça hareketsizdir (Anderson, 1996), ancak bu hareketliliğinin N noksanlığıyla birlikte artış gösterdiği belirlenmiştir. Kükürt noksanlığı durumunda bitki içinde bulunan organik S'ün taşınımının arttırıp arttırmadığı da tam olarak açıklanmamıştır. Yapılan bir çalışmada, kükürt noksanlığı durumunda soya yapraklarında hareketsiz S'ün çok az oranda hareket ettiği, buna karşın S noksanlığı durumunda buğday ve soyanın olgunlaşmasını tamamlamış yapraklarında proteine bağlı S'ün parçalandığı ve hareket ettiği bildirilmiştir (Anderson, 1996). Mezofil hücrelerin vakuollerinde depo edilen sülfatın nispeten hareketsiz olduğu ve S noksanlığı durumunda bunun vakuol dışına taşınımının yavaş olduğu bildirilmiştir (Clarkson ve ark., 1993).

Buna karşılık, köklerden yeşil aksama ksilem yoluyla taşınan sülfatın büyük bir kısmı yaşlı yapraklardaki vakuol sülfatıyla birbirine karışmadığı, bununla birlikte köklerden yeşil aksama gönderilen sülfatın hızlı bir biçimde floeme geçtiği ve buradan genç yapraklara ve köklere taşındığı bildirilmiştir (Burke ve ark., 1986; Herschbach ve Rennenberg, 1995).

Kükürt noksanlığına karşı yapılan, kükürt gübrelemelerinin bitki büyümesinde ve veriminde büyük artışlara neden olmuştur. Bu artışlar, dünyanın bir çok ülkesinde özellikle Kuzey Kanada, A.B.D'nin Kuzey bölgelerinde, Güney Asya'da, Avusturalya'da ve Yeni Zelanda'da görüldüğü bildirilmiştir (Tisdale ve ark.,1986; Pasricha, 1993). İngiltere'de S gübrelemeleri ile sağlanan verim artışları %5 ile 20 arasında görülmesine karşın, tarla koşullarında toprağa yapılan S gübrelemesi sağlanan artışların %5 ile 50 arasında değiştiği bildirilmiştir (Rasmussen ve Kresge, 1986). Azot ve S beslenmesi arasında kuvvetli bir ilişki bulunmaktadır ve bu nedenle bitkinin S'e olan yanıtı büyük ölçüde kullanılan N'lu gübre miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Buna karşın aşırı N'lu gübre uygulamasının ise S noksanlığını şiddetlendirdiği ve genelde yeterli N'la beraber uygulanan S'ün ise verimi daha çok arttırdığı bildirilmiştir (McGrath ve ark., 1996; Rasmussen ve Kresge, 1986).

Toprağa yapılan kükürt gübrelemesi ile buğday dışında kanolada da önemli verim artışlarına neden olduğu ile ilgili birçok çalışmada bildirilmiştir (McGrath ve ark., 1996). Kanolaya yapılan S gübrelemesi ile yalnızca verim artışı üzerinde değil aynı zamanda kalite parametreleri üzerinde de önemli etkisinin olduğu bildirilmiştir (Zhao ve ark., 1997; Blake-Kalff ve ark., 1998; Fismes ve ark., 2000).

Buğday bitkisinin gelişim dönemlerine bağlı olarak bitkinin S konsantrasyonunun değiştiği bildirilmiştir. Örneğin buğdayda kardeşlenme döneminde bitkilerin yeşil aksamındaki kritik S konsantrasyonun 2.2 mg g^{-1} , sapa kalkmada ve süt dolum dönemlerinde ise sırasıyla 1.9 ve 1.5 mg g^{-1} olduğu belirlenmiştir (Zhao ve ark., 1997).

Başaklanmasını tamamlamış buğdayı bayrak yaprağının kritik S konsantrasyonunun ise 1.9 mg g^{-1} olduğu bildirilmiştir (Pasricha, 1993). Buğdayın dane olgunluk dönemine doğru gidildikçe topraktan kaldırdığı S miktarının arttığı ve toprağın yeterli S içermesi durumunda kışlık buğday tarafından kaldırılan S miktarının $15\text{-}25 \text{ kg ha}^{-1}$ arasında değiştiği bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda toprakta kükürt 2 ile 3 kg ha^{-1} olduğunda, kışlık buğdaydan 1 ton dane verimi elde edilebileceği bildirilmiştir (Zhao ve ark., 1999).

3. MATERYAL ve METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Sera denemelerinde kullanılan toprak

Sera denemesinde, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Döner Sermaye İşletmesine ait araziden alınan toprak kullanılmıştır. Denemede kullanılan toprağın bitkiye yarayışlı P (4.8 mg kg⁻¹) ve S (12.2 mg kg⁻¹) konsantrasyonları düşük olup, bu toprağın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Denemede kullanılan toprağın bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri

S	P	K	DTPA'da ekstrakte edilebilir mikroelement konsantrasyonu				
			Cu	Mn	Fe	Zn	
(mg kg ⁻¹)							
12,2	4,8	423	0,54	3,36	2,92	0,15	

				Tekstür (%)			Sınıfı
pH	Tuz (dS cm ⁻¹)	O.M. (%)	CaCO ₃ (%)	Kil	Silt	Kum	
8,02	0,26	1,1	11,2	36	30	34	CL (killi tın)

3.1.2. Sera denemesinde kullanılan bitki materyali

Sera denemesinde Adana 99 ekmeklik buğday (*Triticum aestivum*) buğday çeşidi kullanılmıştır.

3.2. Metod

3.2.1. Sera denemesinin kurulması ve yürütülmesi

Deneme tesadüf parselleri deneme desenine göre sera koşullarında 3'er tekerrürlü olarak kurulmuştur. Plastik saksıların kullanıldığı denemede her saksıya 4 mm elekten elenmiş hava kuru 1750 g toprak konulmuştur. Temel gübreleme olarak her bir saksıya 250 mg kg⁻¹ N, Ca(NO₃)₂, 100 mg kg⁻¹, KNO₃ formunda 2 mg kg⁻¹ Fe , Fe-EDTA formunda ve 2 mg kg⁻¹ Zn, ZnCl₂ formunda uygulama homojen olarak toprakla karıştırılmıştır. Denemeye konu olan fosfor 5 farklı dozda (0, 5, 25, 50 ve 100 mg P kg⁻¹ toprak) ve CaH₄O₈P₂ formunda, kükürt ise 5 farklı dozda (0, 5, 25, 50 ve 100 mg S kg⁻¹) CaSO₄.2H₂O formunda uygulanmıştır. Kükürt ve P dozlarının uygulanması denemenin başlangıcında diğer gübreler ile beraber toprakla homojen bir şekilde karıştırılarak yapılmıştır. Her saksıya 10'ar adet buğday tohumu ekilmiş ve çıkışlardan sonra (bitkiler yaklaşık 8-10 cm iken) sonra saksıdaki bitki sayısı 6'ya seyreltilmiştir. Deneme süresince bitkiler su ihtiyaçlarına göre günlük olarak saf su ile sulanmıştır. Bitkilerin gelişimleri izlenmiş, S ve P noksanlık simptomlarının ortaya çıkışı ile birlikte bitkiler 60. günde hasat edilmiştir. Deneme sonlandırılmadan önce P ve S noksanlık simptom şiddeti klorofilmetre (Minolta SPAD 502) ile SPAD değeri ölçülmüştür. SPAD ölçümü büyümesini tamamlamış en genç yaprağın hemen altındaki yapraklarda 4 tekerrürlü olarak yapılmıştır.

3.2.2. Bitki analizleri

Hasat edilen yeşil aksam (gövde+yaprak) bitki örnekleri asitli su-saf su ile yıkandıktan sonra 48 saat boyunca 70 °C’de etüvde kurutulmuş ve daha sonra hassas terazi ile kuru madde verimleri belirlenmiştir. Kuru madde verimleri belirlenen yeşil aksam bitki örnekleri daha sonra agat değirmeninde öğütülmüştür. Öğütülen örneklerde 200 mg tartılarak mikrodalga cihazında (Mars 6) yaş yakma yöntemine göre HNO₃ - H₂O₂ asit karışımında yakılmış ve daha sonra bu örneklerdeki P ve S konsantrasyonları ICP-OES (Perkin Elmer 7000-DV) cihazında belirlenmiştir (Kacar ve Inal, 2008).

Bitki örneklerindeki azot (N) konsantrasyonları ise Kjeldahl destilasyon yöntemine göre yapılmıştır (Bremner, 1965).

3.2.3. Toprak analizleri

Tez çalışmasında kullanılan toprağın çizelge 1’de verilen fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

Bitkiye yarayışlı Zn, Fe, Mn, Cu konsantrasyonları DTPA yöntemine göre belirlenmiştir (Lindsay ve Norvel, 1978).

Toprağın bitkiye yarayışlı P konsantrasyonu Olsen ve arkadaşları (1954) tarafından geliştirilen yöntemle yapılmıştır.

Toprağın S konsantrasyonu 0.025 M KCl yöntemine göre belirlenmiştir (Bloem ve ark., 2002).

Toprağın K konsantrasyonu 1 N amonyum asetat yöntemine göre belirlenmiştir (Carson , 1980).

Toprağın pH ve Tuz düzeyleri saturasyon çamurunda pH-EC metre ile belirlenmiştir (Jackson, 1959).

Toprağın organik madde düzeyi Walkey-Black yaş yakma metoduyla belirlenmiştir (Jackson, 1959).

Toprağın tekstürü (kum, silt ve kil fraksiyonları) Bouyoucous’a (1952) göre yapılmıştır.

Toprağın kireç düzeyi Scheibler kalsimetresi ile belirlenmiştir (Çağlar, 1949).

3.2.4. İstatistik analizleri

Farklı dozlarda P ve S dozlarının buğday bitkisinin kuru madde verimi, SPAD düzeyi ve yeşil aksam P, S ve N konsantrasyonlarına etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı tek yönlü varyans analizi (ANOVA) testi uygulanarak belirlenmiştir. Dozların etkileri DUNCAN çoklu karşılaştırma testine tabi tutulmuştur. İstatistiksel analizlerde SPSS 21.0 paket programı kullanılmıştır.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Artan Dozlarda P ve S Uygulamalarının Ekmeklik Buğdayın Spad Düzeyi ile Kuru Madde Verimine Etkisi

Bitkilerde kükürt eksikliğinin en belirgin görünümlerinden bir tanesi de yapraklardaki klorofil konsantrasyonunun azalmasıdır (Prasad ve Shivay, 2018). Yapraklardaki klorofil düzeyini ölçmeye yarayan SPAD metre ile yapılan ölçümlerde, S eksikliğinde SPAD değerinin (klorofil düzeyinin) azaldığı buna karşılık S ile beslenme düzeyinin yeterli olduğu durumlarda ise SPAD değerinin arttığı bildirilmiştir (Zhao ve ark., 1996; Sugiura ve ark., 2021). Fosfor ve S eksikliğine sahip toprağa artan dozlarda P ve S uygulamaları ile buğday bitkisinin SPAD düzeyinde istatistiksel olarak önemli değişime neden olmuştur (Çizelge 2). Fosforun 50 mg kg⁻¹ (P50) dozu koşullarında S0 uygulamasında 27 olan SPAD düzeyi S5, S25, S50, ve S100 dozlarında sıra ile 39, 48, 47 ve 48 düzeylerine çıktığı görülmüştür. Ortalama değerler bakımından veriler değerlendirildiğinde S0 dozunda ortalama 32 olan SPAD düzeyi S5, S25, S50, ve S100 dozlarında sıra ile 32, 40, 45, 45 ve 45 düzeylerine çıkmıştır (Çizelge 2). Sonuçlardan da görüleceği gibi bitkinin S ile beslenme düzeyi iyileştikçe bitkideki SPAD düzeyinin buna bağlı olarak da klorofil düzeyinin arttığını göstermektedir.

Çizelge 2. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın SPAD düzeyine olan etkisi

<i>P</i>	<i>S 0</i>	<i>S 5</i>	<i>S 25</i>	<i>S 50</i>	<i>S 100</i>	<i>Ort.</i>
<i>Dozu</i>	SPAD Değeri					
<i>0</i>	38 ^{bB}	37 ^{bB}	37 ^{cB}	40 ^{cA}	41 ^{cA}	39^B
<i>5</i>	47 ^{aA}	46 ^{aA}	46 ^{bA}	44 ^{bB}	43 ^{bB}	45^A
<i>25</i>	24 ^{cC}	40 ^{bB}	49 ^{aA}	48 ^{aA}	47 ^{aA}	42^{AB}
<i>50</i>	27 ^{cC}	39 ^{bB}	48 ^{aA}	47 ^{aA}	48 ^{aA}	42^{AB}
<i>100</i>	25 ^{cD}	36 ^{cC}	46 ^{bB}	46 ^{abB}	48 ^{aA}	40^B
Ort.	32^C	40^B	45^A	45^A	45^A	

Domates bitkisi ile gerçekleştirilen bir araştırmada, S ile yeterli beslenen bitkinin yapraklarındaki klorofil düzeyi, S noksanlığına maruz kalmış bitkinin yapraklarındaki klorofil düzeyinden daha fazla olduğunu ve buna bağlı olarak da klorofil düzeyleri fazla olan bitkilerin protein düzeylerinin de yüksek olduğu bildirilmiştir (Marschner ve ark., 1997). Choudhary ve ark., (2016) inci darısı ile yaptıkları bir çalışmada toprağa artan dozlarda (0, 15, 30 ve 45 kg S ha⁻¹) S uygulamaları ile bitkinin verim ve verim öğelerini incelemişlerdir. Araştırmacılar S uygulama dozu arttıkça bitkilerin SPAD değerlerinde istatistiksel olarak önemli düzeyde artışa neden olduğunu ve bitkilerin SPAD düzeyinin en düşük olduğu dozun S0 (48.4) en yüksek olduğu dozun ise S45 (52.6) olduğunu bildirmişlerdir.

Fosfor uygulamalarında da buğday bitkisinin SPAD düzeyinde önemli bir artışa neden olduğu, ortalama olarak veriler değerlendirildiğinde en yüksek SPAD değeri 45 ile P5 uygulamasında elde edilmiştir (Çizelge 1). Buna karşın P0 ve S0 dozu koşullarında 38 olan SPAD değeri artan P uygulamaları ile azalmış, bu da doğal olarak klorofil seviyelerinde azalmaya neden olmuştur. Bu durum bitkinin P0 koşullarında fosfor noksanlığına bağlı olarak yaprak alanı ve boyutunun küçülmesi ile birlikte yaprakların aşırı koyu yeşil renkte görülmelerinde kaynaklanmaktadır. Fosfor eksikliğinde bitkilerin kuru madde verimi ile yaprak alanları azalmakta, noksanlıkta beraber yapraklar normalden daha koyu yeşil renk almakta ve bitki büyümesi ile fotosentez olumsuz yönde etkilenmektedir (Colomb ve ark., 2000). Yapılan çalışmalarda, fosfor ile yeterli beslenen bitkiler ile fosfor noksanlığı çeken bitkiler karşılaştırıldığında, P noksanlığı altında yetişen bitkilerin yaprak alanı %80 düzeylerinde azalmakta ve buna bağlı olarak da bitkinin fotosentez oranının da % 50 düşmesine neden olmaktadır (Rodriguez ve ark., 1998).

Artan dozlarda toprağa S ve P uygulamaları buğday bitkisinin yeşil aksam kuru madde veriminde istatistiksel olarak önemli artışlara neden olmuştur (Çizelge 3). Fosfor ve S uygulamasının (P0S0) olmadığı koşullarda bitkinin yeşil aksam kuru madde verimi 0.15 g bitki⁻¹ iken fosfor ve kükürt uygulamalarının 100 mg kg⁻¹ olduğu dozla %486.6 düzeyinde artarak 0.88 g bitki⁻¹'e yükselmiştir.

Ortalama değerler üzerinden sonuçlara bakıldığında hem P hem de S uygulamaları birbirlerinden bağımsız olarak kuru madde veriminde artışa neden olmuştur. Örneğın P0 dozlarının ortalama kuru madde verimi 0.15 g bitki⁻¹ iken bu değer P5, P25, P50 ve P100 dozlarında sırası ile ortalama 0.28, 0.71, 0.82 ve 0.83 g bitki⁻¹'e yükselmiştir.

Elde ettiğimiz sonuçlara benzer şekilde, mısır (Erdal ve ark., 2000) ve arpa (Singh ve ark., 2020), buğday (İrfan ve ark., 2018) bitkileri ile yapılan çalışmalarda toprağa artan miktarlarda fosfor uygulamalarının bitkilerin kuru madde verimini önemli düzeyde arttırdığını bildirilmiştir.

İki değişik toprakta farklı N (0, 100 ve 180 kg ha⁻¹) ve S (0, 20, 40 ve 60 kg ha⁻¹) uygulamalarında buğday çeşitlerinin dane verimleri belirlenmiştir. Her iki elementin birbirlerinden bağımsız olan uygulamalarında artan dozların verimi arttırdığı bulunmuştur (Habtegebrial ve Singh, 2009). Söz konusu çalışmada N ve S uygulamalarının optimize edilmesi durumunda bitkinin dane veriminin daha da arttığı görülmüştür. Örneğın N verilmediği ve artan dozlarda S'ün uygulandığı durumda Shehan buğday çeşidinin kontrol uygulamasında (N ve S uygulanmayan koşul) ortalama dane verimi 2.60 ton ha⁻¹ iken, S'ün 20, 40 ve 60 kg ha⁻¹ uygulandığında aynı değerin sırasıyla 2.80, 3.53 ve 3.19 ton ha⁻¹ olduğu saptanmıştır.

Çizelge 3. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın yeşil aksam kuru madde verimine olan etkisi

<i>P</i>	<i>S 0</i>	<i>S 5</i>	<i>S 25</i>	<i>S 50</i>	<i>S 100</i>	Ort.
<i>Dozu</i>	Kuru Madde Verimi (mg bitki ⁻¹)					
0	0,15 ^{dA}	0,15 ^{dA}	0,14 ^{eA}	0,15 ^{dA}	0,14 ^{dA}	0,15^D
5	0,28 ^{cA}	0,28 ^{cA}	0,27 ^{dA}	0,28 ^{cA}	0,28 ^{cA}	0,28^C
25	0,68 ^{bC}	0,72 ^{bB}	0,73 ^{cB}	0,65 ^{bC}	0,79 ^{bA}	0,71^B
50	0,74 ^{aC}	0,81 ^{aB}	0,88 ^{bA}	0,82 ^{aB}	0,87 ^{aA}	0,82^A
100	0,71 ^{abE}	0,79 ^{aD}	0,92 ^{aA}	0,84 ^{aC}	0,88 ^{aB}	0,83^A
Ort.	0,51^C	0,55^B	0,59^A	0,55^B	0,59^A	

Fosfor ve kükürtün bitki metabolizmasında sinergistik bir ilişkisi vardır. Bu sinergistik ilişkiden dolayı bu elementleri özellikle yağlı tohum veren bitkilere dengeli bir şekilde verilmesi sonucu bitkilerde verim ve kalite artmaktadır (Salame ve ark., 2020).

Çalışmada ortaya çıkan önemli başka bir sonuç ise S ve P uygulamaları dozlarının oransal artışına paralel şekilde bitki kuru madde verimlerinin de artması olmuştur.

Uygulama dozları bakımından sonuçlar değerlendirildiğinde fosforun 50 ve 100 mg kg⁻¹, kükürtün ise 25 ve 50 mg kg⁻¹ dozlarının birlikte uygulandığı durumlarda en yüksek kuru madde verimine neden olduğu ortaya çıkmıştır. Fosfor ve S uygulamalarının olmadığı durumda 0.15 g bitki⁻¹ olan yeşil aksam kuru madde verimi P50-S25 dozunda 0.88 mg kg⁻¹'e, P100-S25 dozunda ise 0.92 g bitki⁻¹'e çıktığı görülmüştür. Elde ettiğimiz sonuçlara benzer şekilde, elementel-S ve P'un karıştırılarak birlikte toprağa uygulanması sonucu bitkinin kuru madde miktarının önemli düzeyde arttığı bildirilmiştir (Lefroy ve ark., 1993). Çeltik bitkisine kükürt ve fosforun birlikte uygulamalarının bitkinin kuru madde verimi ile tane verimini önemli derecede arttırdığını ve birlikte uygulamanın kontrol parseline oranla sap veriminde % 65, tane veriminde % 61 ve kuru madde verimini ise % 20 arttırdığı bildirilmiştir (Ali ve ark., 2004).

Bununla beraber S uygulamasının olmadığı durumlarda artan P uygulamaları bitkinin kuru madde verimini arttırmıştır. Ancak ortaya çıkan bu artış kükürt uygulamalarının olduğu koşullardan düşük olduğu görülmüştür (Çizelge 3). Örneğin P100 S0 dozu koşullarında 0.71 g bitki⁻¹ olan yeşil aksam kuru madde verimi P100 dozunun artan S uygulamaları altında sırası ile 0.79, 0.92, 0.84 ve 0.88 g bitki⁻¹'e yükseldiği görülmüştür. Jaggi (1998), hardal bitkisine kükürt ve fosfor uygulamaları ile bitkinin veriminin önemli düzeyde arttırdığını ve en yüksek verim artışının ise 90 kg ha⁻¹ S ve 26.2 kg ha⁻¹ P uygulamalarında elde edildiğini bildirmişlerdir.

4.2. Artan Dozlarda P ve S Uygulamalarının Ekmeklik Buğdayın Yeşil Aksam P, S ve N Konsantrasyonlarına Etkisi

Artan dozlarda P ve S uygulamaları ile buğday bitkisinin yeşil aksam P ve S konsantrasyonlarında istatistiksel olarak önemli düzeyde artışa neden olduğu görülmüştür (Çizelge 4 ve 5). Kükürt uygulamalarına bakılmaksızın toprağa artan dozlarda P uygulamaları ile buğday bitkisinin P konsantrasyonlarında artış meydana gelmiştir. Fosforun 0 mg kg⁻¹ olan ortalama P konsantrasyonu %0.07 iken, P5, P25, P50 ve P100 dozlarında sıra ile ortalama %0.10, %0.23, %0.33 ve %0.55'e çıkmıştır (Çizelge 4). Konu ile ilgili yapılan araştırmalarda, özellikle fosforun bitki gelişimi açısından önemli olduğu ve toprağa uygulanan fosfor ile bitkinin farklı organlarındaki fosfor konsantrasyonlarının paralel şekilde arttığı bildirilmiştir (Holford, 1997; Bertossi ve ark., 2013).

Çizelge 4. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın yeşil aksam P konsantrasyonuna (%) olan etkisi

P	S 0	S 5	S 25	S 50	S 100	Ort.
Dozu	Yeşil Aksam P Konsantrasyonu (%)					
0	0,07 ^{dA}	0,08 ^{eA}	0,04 ^{eB}	0,06 ^{eA}	0,08 ^{dA}	0,07^D
5	0,09 ^{dA}	0,11 ^{dA}	0,09 ^{dA}	0,10 ^{dA}	0,10 ^{dA}	0,10^D
25	0,31 ^{cA}	0,23 ^{cB}	0,21 ^{cB}	0,19 ^{cB}	0,20 ^{cB}	0,23^C
50	0,44 ^{bA}	0,32 ^{bB}	0,30 ^{bB}	0,28 ^{bB}	0,31 ^{bB}	0,33^B
100	0,71 ^{aA}	0,57 ^{aB}	0,49 ^{aC}	0,51 ^{aC}	0,49 ^{aC}	0,55^A
Ort.	0,32^A	0,26^B	0,22^C	0,23^C	0,24^{BC}	

Çalışmadan ortaya çıkan önemli başka bir sonuç ise, artan dozlarda P uygulamaları ile yeşil aksam P konsantrasyonlarındaki artışın S uygulamaları ile azalmasıdır. Fosfor uygulamalarına bakılmaksızın S0 dozunun ortalama P konsantrasyonu %0.32 iken bu değer S5, S25, S50 ve S100 dozlarında sırası ile ortalama %0.26, %0.22, %0.23 ve %0.24'e düşmüştür (Çizelge 4). Fosforlu gübre uygulaması, anyon adsorpsiyon alanlarında tutulan sülfat anyonlarının toprak çözeltisine salınmasına, bunların yerine de fosfat anyonlarının tutulmasına neden olmaktadır.

Bu sayede bitki kökleri tarafından S alım miktarında artış meydana gelmektedir (Tiwari ve Gupta, 2006). Literatür bilgilerine göre, kükürt ve fosfor arasında hem sinergistik hem de antagonistik bir ilişki olduğunu ve bu ilişkinin uygulama dozlarına ve bitki çeşidine bağlı olarak değiştiği bildirilmiştir (Sinha ve ark., 1995).

Yapılan çalışmaların bazılarında toprağa uygulanan fosfor ve kükürdün nohut bitkisinde sinergistik etkide bulunduğu (Pandey ve ark., 2003), buna karşın toprağa uygulanan fosfor ve kükürdün ayçiçeği ile buğdayda (İslam ve ark., 2006) ve mercimek ile nohutta (Hedge ve Murthy, 2005) ise antagonistik etkide bulunduğunu bildirmişlerdir.

Fosfor konsantrasyonlarında olduğu gibi toprağa artan dozlarda S uygulamaları buğday bitkisinin S konsantrasyonlarında artışa neden olmuş, bu artış S0 dozunda ortalama %0.16 iken S5, S25, S50 ve S100 dozlarında sıra ile %0.23, %0.30, %0.34 ve %0.39'a çıkmıştır (Çizelge 5). Shivay ve ark. (2014), buğday bitkisine topraktan 0 ve 45 kg ha⁻¹ S uygulaması sonucu S0 dozu koşullarında yeşil aksam S konsantrasyonunun %0.103 olduğunu ve 45 kg S uygulandığında %0.126'ya çıktığını belirtmişlerdir. Makarnalık buğday çeşitlerinde ise S0 dozunda ortalama sürgün S konsantrasyonu %0.11 iken, S45 düzeyinde ise bu değer %0.42'ye çıktığını bildirmişlerdir. S konsantrasyonlarında önemli artışa neden olduğunu bildirmiştir. Bitkilerde ortaya çıkan S noksanlığına karşı alınabilecek en kolay yol topraktan gübrelemedir. Kükürtlü gübrelerin kullanılması sonucu bitkilerin S ile beslenme düzeyinin iyileşmesinin yanında, S'ün (özellikle elementer S) toprakta asit etkide bulunması sonucu azda olsa toprağın pH'sının düşmesi ile birlikte özellikle mikro elementler ve fosforun bitkiler tarafından alınabilirliği artmaktadır (Erdem, 2004).

Çizelge 5. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın yeşil aksam S konsantrasyonuna (%) olan etkisi

P	S 0	S 5	S 25	S 50	S 100	Ort.
Dozu	Yeşil Aksam S Konsantrasyonu (%)					
0	0,22 ^{aC}	0,24 ^{abC}	0,14 ^{cD}	0,30 ^{cB}	0,38 ^{aA}	0,25^B
5	0,23 ^{aD}	0,27 ^{aC}	0,31 ^{bB}	0,31 ^{cB}	0,39 ^{aA}	0,30^A
25	0,13 ^{bD}	0,22 ^{bC}	0,32 ^{bB}	0,34 ^{bAB}	0,36 ^{bA}	0,27^{AB}
50	0,12 ^{bD}	0,21 ^{bC}	0,36 ^{aB}	0,39 ^{aA}	0,40 ^{aA}	0,29^A
100	0,13 ^{bD}	0,19 ^{bC}	0,36 ^{aB}	0,38 ^{aA}	0,41 ^{aA}	0,29^A
Ort.	0,16^E	0,23^D	0,30^C	0,34^B	0,39^A	

Toprağa artan dozlarda P ve S uygulamaları ile buğday bitkisinin azot (N) konsantrasyonlarında istatistiksel olarak önemli artışa neden olduğu görülmüştür (Çizelge 6). Fosfor uygulamalarından bağımsız olarak sonuçlar değerlendirildiğinde S0 dozu koşullarında %3.76 olan yeşil aksam N konsantrasyonu S5 dozunda %3.99'a, S25 dozunda %4.09'a, S50 dozunda %4.15'e ve S100 dozunda ise %4.16'ya yükselmiştir.

Kükürt uygulaması ile ortaya çıkan bu sonuçlara benzer şekilde P uygulamaları ile de N konsantrasyonlarında artışa neden olmuştur (Çizelge 6). Erdem (2004), farklı tekstüre sahip topraklara artan dozlarda S uygulaması ile ekmeklik ve makarnalık buğdayların yeşil aksam N konsantrasyonunda da önemli artışlar elde edildiğini, bitkilerin yeşil aksamındaki S konsantrasyonu ile N konsantrasyonu arasında önemli ve pozitif bir ilişki olduğu bildirmiştir. Bitkilerdeki kükürt konsantrasyonunun artması, protein kalitesini ve yüzde oranını etkiler, ayrıca amino asit içeren kükürt miktarını artırır (Grant ve Rowel, 1978). Bilindiği gibi, azot ve kükürt protein sentezinde önemli rol almaktadır. Yapılan çalışmalarda S noksanlığı altındaki bitkilerde protein sentezinde önemli azalmalar görülürken, bitkide çözünür organik azot ve nitrat konsantrasyonunda artışlar görüldüğü saptanmıştır (Marschner ve ark., 1997). Kükürt uygulamalarıyla bitkinin yeşil aksamındaki N konsantrasyonu değişmemesine karşın S'süz kükürt uygulanmayan (kontrol) bitkilerde fazla miktarda nitrat azotunun biriktiği görülmüştür. Bu sonuçlar S noksanlığının bitkinin N metabolizmasını bozduğunu göstermektedir (McGrath ve Zhao, 1996).

Çizelge 6. Artan dozlarda P ve S uygulamalarının ekmeklik buğdayın yeşil aksam N konsantrasyonuna (%) olan etkisi

<i>P</i>	<i>S 0</i>	<i>S 5</i>	<i>S 25</i>	<i>S 50</i>	<i>S 100</i>	<i>Ort.</i>
<i>Dozu</i>	Yeşil Aksam N Konsantrasyonu (%)					
0	3,53 ^{dC}	3,62 ^{cBC}	3,70 ^{cB}	3,81 ^{dA}	3,77 ^{cA}	3,69^C
5	3,80 ^{bB}	3,88 ^{bB}	3,79 ^{cB}	3,94 ^{cA}	4,03 ^{bA}	3,89^B
25	3,67 ^{cB}	3,91 ^{bAB}	4,10 ^{bA}	4,09 ^{cA}	4,27 ^{abA}	4,01^B
50	3,83 ^{bC}	4,27 ^{aB}	4,41 ^{aA}	4,28 ^{bB}	4,34 ^{aAB}	4,22^A
100	3,95 ^{aC}	4,25 ^{aB}	4,46 ^{aB}	4,61 ^{aA}	4,39 ^{aB}	4,33^A
Ort.	3,76^C	3,99^B	4,09^{AB}	4,15^A	4,16^A	

Çalışmada ortaya çıkan önemli başka bir sonuç ise S ve P uygulamaları dozlarının oransal artışına paralel şekilde bitkinin yeşil aksam N konsantrasyonlarının da artması görülmüştür. Uygulama dozları bakımından sonuçlar değerlendirildiğinde fosforun 50 ve 100 mg kg⁻¹, kükürtün ise 25 ve 50 mg kg⁻¹ dozlarının birlikte uygulandığı durumlarda en yüksek N konsantrasyonlarına neden olduğu ortaya çıkmıştır. Örneğin P0/S0 dozunda buğday bitkisinin yeşil aksam N konsantrasyonu %3.53 iken bu değer P50/S25 dozunda %4.41'e, P100/S50 dozunda ise % 4.61'e yükselmiştir (Çizelge 6).

Sonuçlar bize bitkinin S ve P ile beslenme düzeyi artışına paralel olarak N konsantrasyonlarında artışa neden olduğu ve P ve S uygulamaları ile N konsantrasyonları arasında pozitif ilişkinin olduğu ortaya çıkmıştır. Dwivedi ve Bapat (1998), soya fasulyesi üzerine fosfor ve kükürt uygulamalarının tohum verimini, protein ve yağ içeriğini önemli derecede arttırdığını bildirmişlerdir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Dünyada insan nüfusunun artışına paralel şekilde, gıdaya olan ihtiyaç da artmaktadır. Bu nedenle de yoğun tarımsal faaliyetlerle beraber besin elementi eksikliğinin ciddiyeti ön plana çıkmakta, bununla birlikte de besin elementleri arasındaki etkileşimlerin önemi giderek artmaktadır. Son yıllarda ülkemiz tarımı çoklu besin elementi eksikliği sürecine girmiş bulunmaktadır. Bu sorunun çözümü olarak, dengeli ve etkili gübre kullanımı karşımıza çıkmaktadır. Dengeli gübreleme, verimde artışla beraber kaliteli ürün elde etmek, aynı zamanda etkili gübre kullanımının ana unsuru arasındadır.

Elde edilen sonuçlara göre;

- Fosfor ve S eksikliğine sahip toprağa artan dozlarda P ve S uygulamaları ile buğday bitkisinin SPAD düzeyinde istatistiksel ($P<0.05$) olarak önemli değişime neden olmuş, bitkinin S ile beslenme düzeyi iyileştikçe bitkideki SPAD düzeyinin ve buna bağlı olarak da klorofil düzeyinin arttığı görülmüştür.
- Artan dozlarda toprağa S ve P uygulamaları buğday bitkisinin yeşil aksam kuru madde veriminde istatistiksel ($P<0.05$) olarak önemli artışlara neden olmuş, P ve S uygulamasının (P0S0) olmadığı koşullarda bitkinin yeşil aksam kuru madde verimi $0.15 \text{ g bitki}^{-1}$ iken P ve S uygulamalarının 100 mg kg^{-1} olduğu dozda %486.6 düzeyinde artarak $0.88 \text{ g bitki}^{-1}$ 'e yükselmiştir. Sonuçlardan da görüleceği üzere, hem P hem de S uygulamaları birbirlerinden bağımsız olarak kuru madde veriminde önemli artışlara neden olmuştur.
- Kükürt ve P uygulamaları dozlarının oransal artışına paralel şekilde bitki kuru madde verimleri de artmış, sonuçlar bize P'un 50 ve 100 mg kg^{-1} , S'in ise 25 ve 50 mg kg^{-1} dozları bitkide en yüksek kuru madde verimi artışına neden olduğu ortaya çıkmıştır.

- Artan dozlarda P ve S uygulamaları ile buğday bitkisinin yeşil aksam P ve S konsantrasyonlarında istatistiksel olarak önemli düzeyde artışa neden olduğu, buna karşın artan S uygulamaları ile bitkinin yeşil aksam P konsantrasyonlarında azalmaların olduğu görülmüştür. Buda P konsantrasyonu üzerine S'ün antagonistik etkide bulunduğunu göstermiştir.

- Toprakta S ve P uygulama dozlarının oransal artışı ile buğday bitkisinin yeşil aksam N konsantrasyonlarında istatistiksel olarak önemli artışa neden olmuş ve uygulama dozları bakımından sonuçlar değerlendirildiğinde fosforun 50 ve 100 mg kg⁻¹, kükürdün ise 25 ve 50 mg kg⁻¹ dozlarının birlikte uygulandığında en yüksek N konsantrasyon düzeyine ulaşmasına neden olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlarda bize, bitkinin S ve P ile beslenme düzeyi artışına paralel olarak N konsantrasyonlarında artışa neden olduğu ve P ve S uygulamaları ile N konsantrasyonları arasında pozitif ilişkinin olduğu ortaya koymaktadır.

Yukarıdaki sonuçlar dikkate alındığında aşağıdaki önerileri sıralayabiliriz:

- Bitkilerin kükürt ve fosfor beslenmesi için, tarla ve sera koşulları altında yapılacak çalışmalarda bu elementlerinin ideal uygulama dozlarının belirlenmesi gerekir.

- Sera koşullarında gerçekleştirilen deneme sonucu görülmüştür ki fosfor ve kükürt elementleri arasında intereaksiyon vardır. Bu sebeple her iki element için gübreleme hususunda ideal miktarın doğru belirlenmesi önem arz etmektedir.

- Sera koşullarında ve Çizelge 1.'de belirtilen özelliklere sahip toprakta gerçekleştirilen bu çalışmada kükürt ve fosfor noksanlığına sahip topraklarda her iki elementin gübrelemesi yapılarak verim kayıplarının önüne geçilebileceği anlaşılmıştır. Farklı pH veya farklı tekstüre sahip topraklarda sonuçlar farklılık gösterebilir. Benzer çalışmaların tarla koşullarında ve farklı tip topraklarda da gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır.

6. KAYNAKÇA

- Ali, M. M., Mian, M. S., Islam, A., Begum, J. A., & Ferdous, A. K. M. (2004). Interaction effects of sulphur and phosphorus on wetland rice. *Asian Journal of Plant Sciences*.
- Alpaslan, M., Güneş, A., Inal, A., 1998. Deneme Tekniği. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın No: 1501, Ders Kitabı: 455 s: 437.
- Anderson, J. W. (1990). Sulfur metabolism in plants. *The biochemistry of plants*, 16, 327-381.
- Anderson, J. W. (1996). Effect of sulfur nutrition on the redistribution of sulfur in vegetative soybean plants. *Plant Physiology*, 112(2), 623-631.
- Anonim, 2018. Bitkisel Üretim İstatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu (https://biruni.tuik.gov.tr/bitkisel_app/bitkisel.zul), (Erişim tarihi: 20.06.2021).
- Atkinson, D. (1973). Some general effects of phosphorus deficiency on growth and development. *New Phytologist*, 72(1), 101-111.
- Balemi, T., & Negisho, K. (2012). Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of soil science and plant nutrition*, 12(3), 547-562.
- Barber, S. A., & Silberbush, M. (1984). Plant root morphology and nutrient uptake. *Roots, nutrient and water influx, and plant growth*, 49, 65-87.
- Barton, D., Hope, D., Billett, M. F., & Cresser, M. S. (1994). Sulphate adsorption capacity and pH of upland podzolic soils in Scotland: effects of parent material, texture and precipitation chemistry. *Applied geochemistry*, 9(2), 127-139.
- Bertossi, A. P. A., Thomazini, A., da Fonseca, A. S., & do Amaral, J. F. T. (2013). Nutritional efficiency of phosphorus in Lettuce. *Journal of Agricultural Science*, 5(8), 125.
- Blake-Kalff, M. M., Harrison, K. R., Hawkesford, M. J., Zhao, F. J., & McGrath, S. P. (1998). Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth. *Plant physiology*, 118(4), 1337-1344.
- Bloem, E., Haneklaus, S., & Schnug, E. (2002). Optimization of a method for soil sulphur extraction. *Communications in soil science and plant analysis*, 33(1-2), 41-51.
- Bornemisza, E., & Llanos, R. (1967). Sulfate movement, adsorption, and desorption in three Costa Rican soils. *Soil Science Society of America Journal*, 31(3), 356-360.
- Bouyoucos, G.J., 1952. Hydrometer method improved for making particle size at analysis of soil. *Argon. J.* 54(5): 464-465.
- Bremner, J.M., 1965. Total nitrogen. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbio-logical properties, 1149-1178.
- Burke, J. J., Holloway, P., & Dalling, M. J. (1986). The effect of sulfur deficiency on the organisation and photosynthetic capability of wheat leaves. *Journal of Plant Physiology*, 125(3-4), 371-375.
- Calanca, P. P. 2017. Effects of abiotic stress in crop production. In Quantification of climate variability, adaptation and mitigation for agricultural sustainability (pp. 165-180). Springer, Cham.
- Camberato, J., & Casteel, S. (2017). Sulfur deficiency. *Purdue Univ. Dep. of Agronomy, Soil Fertility Update*.
- Carson, P. L. (1980). Recommended potassium test. *Recommended chemical soil test procedures for the north central region, Bulletin*, 499, 17-18.

- Chahal, H. S., Sing, A., & Malhi, G. S. (2020). Role of Sulphur nutrition in oilseed crop production-A review. *Journal of Oilseed Brassica*, 11(2), 95-102.
- Chapman, S. J. (1997). Barley straw decomposition and S immobilization. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(2), 109-114.
- Choudhary, M., Rana, K. S., Rana, D. S., & Bana, R. S. (2016). Tillage and crop residue effects in rainfed pearl millet (*Pennisetum glaucum*) in conjunction with sulphur fertilization under pearl millet-Indian mustard (*Brassica juncea*) cropping system. *Indian Journal of Agronomy*, 61(1), 15-19.
- Clarkson, D.T., Hawkesford, M.J. and Davidian, J.-C. 1993. Membrane and long-distance transport of sulfate. In «Sulfur Nutrition and Assimilation in Higher Plants». (L.J. De Kok, I. Stulen, H. Rennenberg, C. Brunold and W.E., Rauser eds.), SPB Academic Publishing bv, The Hague, pp. 3–19.
- Colomb, B., Kiniry, J. R., & Debaeke, P. (2000). Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown maize. *Agronomy Journal*, 92(3), 428-435.
- Condon, L. M., Turner, B. L., & Cade-Menun, B. J. (2005). Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. *Phosphorus: Agriculture and the environment*, 46, 87-121.
- Çağlar, K.Ö., 1949. Toprak Su Koruma Mühendisliği. Çukurova Univ. Zir. Fak. Yayın No: 108, Adana.
- Dwivedi, A. K., & Bapat, P. N. (1998). Sulphur-P~osphorus Interaction on the Synthesis of Nitrogenous Fractions and Oil in Soybean. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 46(2), 254-257.
- Erdal, İ., Bozkurt, M. A., Çimrin, K. M., Karaca, S., & Sağlam, M. (2000). Effects of Humic Acid and Phosphorus Applications on Growth and Phosphorus Uptake of Corn Plant (*Zea mays*L.) Grown in a Calcareous Soil. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 24(6), 663-668.
- Erdem, H., 2004. Farklı bölge topraklarında kükürt uygulamasının buğdayın kuru madde verimi üzerine olan etkisinin sera koşullarında belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi., Kod No: 2401.
- Eriksen, J., Murphy, M. D., & Schnug, E. (1998). The soil sulphur cycle. In *Sulphur in agroecosystems* (pp. 39-73). Springer, Dordrecht.
- Eyüpoğlu, F. 1999. Türkiye topraklarının verimlilik durumu. Toprak ve Gübre Arşt. Enst. Genel Yayınları No: 220, Ankara. 221 sayfa.
- Fismes, J., Vong, P. C., Guckert, A., & Frossard, E. T. H. I. O. P. I. A. N. (2000). Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *European Journal of Agronomy*, 12(2), 127-141.
- Föhse, D., Claassen, N., & Jungk, A. (1991). Phosphorus efficiency of plants. *Plant and soil*, 132(2), 261-272.
- Freney, J. R. (1986). Forms and reactions of organic sulfur compounds in soils. *Sulfur in agriculture*, 27, 207-232.
- Gahoonia, T. S., Nielsen, N. E., & Lyshede, O. B. (1999). Phosphorus (P) acquisition of cereal cultivars in the field at three levels of P fertilization. *Plant and Soil*, 211(2), 269-281.
- Grant, P. M., & Rowell, A. W. G. (1978). distribution of sulphate and total sulphur in maize plants (*Zea mays* L.) in relation to the diagnosis of deficiency. *Rhod J Agric Res.*

- Gupta, A. K., Maheshwari, A., & Khanam, R. (2020). Assessment of phosphorus fixing capacity in different soil orders of India. *Journal of Plant Nutrition*, 43(15), 2395-2401.
- Habtegebrial, K., & Singh, B. R. (2009). Response of wheat cultivars to nitrogen and sulfur for crop yield, nitrogen use efficiency, and protein quality in the semiarid region. *Journal of plant nutrition*, 32(10), 1768-1787.
- Hammond, J. P., Broadley, M. R., & White, P. J. (2004). Genetic responses to phosphorus deficiency. *Annals of botany*, 94(3), 323-332.
- Haneklaus, S., Murphy, D. P. L., Nowak, G., & Schnug, E. (1995). Effects of the timing of sulphur application on grain yield and yield components of wheat. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 158(1), 83-85.
- Hawkesford, M. J., & De Kok, L. J. (2006). Managing sulphur metabolism in plants. *Plant, Cell & Environment*, 29(3), 382-395.
- Hedge, D.M. and Murthy, I. 2005. Management of secondary nutrients. *Indian J. Fert.* 1: 93-100.
- Herschbach, C., & Rennenberg, H. (1995). Long-distance transport of ³⁵S-sulphur in 3-year-old beech trees (*Fagus sylvatica*). *Physiologia Plantarum*, 95(3), 379-386.
- Holford, I. C. R. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Soil Research*, 35(2), 227-240.
- Inal, A., (2001). Fosfor alımı ve fosfor etkinliği yönünden bazı ekmeklik (*T. aestivum*) ve makarnalık (*T. durum*) buğday genotipleri arasındaki farklılıkların belirlenmesi. *Journal of Agricultural Sciences*, 7(02).
- Irfan, M., Abbas, M., Shah, J. A., & Memon, M. Y. (2018). Internal and external phosphorus requirements for optimum grain yield are associated with P-utilization efficiency of wheat cultivars. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(22), 2843-2853.
- Islam, M. M. & Dick, R. P. (1998) Effect of organic residue amendment on mineralization of sulphur in flooded rice soils under laboratory conditions . *Communication of Soil Science Plant Analysis*, 29, 955-969 .
- Jackson, M.L., 1959. Soil chemical analysis. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Jaggi, R.C. 1998. Indian mustard maturity, yield and seed: straw effected by phos. and sulphur fertilization, *Indian Journal of Agronomy*, 43:129-132.
- Kacar, B. ve Inal, A. 2008. Bitki Analizleri Nobel Yay., ISBN 978-605-395-036-3.
- Kacar, B., Katkat, V., 1997. Tarımda fosfor. Bursa Ticaret Borsası Yayınları.
- Katkat, V., & Kaplan, M. (1990). Gübre tüketimindeki bazı eğilimleri fiyat faktörünün etkileri.
- Kordali, Ş., Zengin, H., 2011. Bayburt yöresinde arpa ekim alanlarında görülen yabancı otlar, yoğunlukları, yaygınlıkları ve topluluk oluşturma durumları üzerinde çalışmalar. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 42(2): 117-131.
- Kparmwang, T., Esu, I. E., & Chude, V. O. (1997). Sulphate adsorption and desorption characteristics of three ultisols and an alfisol developed on basalts in the Nigerian Savanna. *Discovery and Innovation*, 9(3), 197-204.
- Lazali, M., & Drevon, J. J. (2021). Mechanisms and Adaptation Strategies of Tolerance to Phosphorus Deficiency in Legumes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1-15.
- Lefroy, R. D., Blair, G. J., & Strong, W. M. (1993). Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ¹³ C natural isotope abundance. *Plant and soil*, 155(1), 399-402.

- Leustek, T., & Saito, K. (1999). Sulfate transport and assimilation in plants. *Plant physiology*, 120(3), 637-644.
- Lindsay, W.L., & Norvell, W., A., 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. J.*, 42: 421-428.
- Magid, J., Tiessen, H., & Condron, L. M. (1996). Dynamics of organic phosphorus in soils under natural and agricultural ecosystems. In *Humic substances in terrestrial ecosystems* (pp. 429-466). Elsevier Science BV.
- Manske, G. G. B., Ortiz-Monasterio, J. I., Van Ginkel, M., Gonzalez, R. M., Rajaram, S., Molina, E., & Vlek, P. L. G. (2000). Traits associated with improved P-uptake efficiency in CIMMYT's semidwarf spring bread wheat grown on an acid Andisol in Mexico. *Plant and Soil*, 221(2), 189-204.
- Mardamootoo, T., Du Preez, C. C., & Barnard, J. H. (2021). Phosphorus management issues for crop production: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 17(7), 939-952.
- Margalef, O., Sardans, J., Maspons, J., Molowny-Horas, R., Fernández-Martínez, M., Janssens, I. A., ... & Peñuelas, J. (2021). The effect of global change on soil phosphatase activity. *Global Change Biology*, 27(22), 5989-6003.
- Marschner, H. 2011 Marschner's mineral nutrition of higher plants Academic press.
- Marschner, P., Crowley, D. E., & Higashi, R. M. (1997). Root exudation and physiological status of a root-colonizing fluorescent pseudomonad in mycorrhizal and non-mycorrhizal pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plant and soil*, 189(1), 11-20.
- Martini, J. A., & Mutters, R. G. (1984). Effect of liming and fertilization on sulfur availability, mobility, and uptake in cultivated soils of south carolina1. *Soil science*, 138(6), 403-410.
- McGrath, S. P., & Zhao, F. J. (1996). Sulphur uptake, yield responses and the interactions between nitrogen and sulphur in winter oilseed rape (*Brassica napus*). *The Journal of Agricultural Science*, 126(1), 53-62.
- McGrath, S. P., Zhao, F. J., & Withers, P. J. A. (1996). Development of sulphur deficiency in crops and its treatment. *Proceedings-Fertiliser Society (United Kingdom)*.
- McGrath, S. P., Zhao, F., & Blake-Kalff, M. M. (2003). Sulphur in soil: processes, behaviour and measurement. *Nawozy i Nawożenie*, 5(2 [15]).
- Mehlich, A. (1964). Influence of sorbed hydroxyl and sulfate on liming efficiency, pH, and conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 28(4), 496-499.
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T. S., Blackwell, M., Stutter, M., ... & Haygarth, P. M. (2018). Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant and Soil*, 427(1), 5-16.
- Mithen, R. (2006). Sulphur-containing compounds. *Plant Secondary Metabolites: Occurrence, Structure and Role in the Human Diet*, 25-46.
- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. (2011). Role of phosphatase enzymes in soil. In *Phosphorus in action* (pp. 215-243). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Nguyen, V. L., & Stangoulis, J. (2019). Variation in root system architecture and morphology of two wheat genotypes is a predictor of their tolerance to phosphorus deficiency. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(7), 1-13.
- Olsen, S., R., Cole, C., V., Watanabe, F., S., Dean, L., A. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ., 939. U.S. Gov. Print Office, Washington D.C.

- Pandey IP, Sharan OM and Pandey SB. 2003. Response of linseed to different levels of phosphorus and sulphur application. *Ann. Plant Soil Res.* 5: 99-101.
- Pasricha, N. A. (1993). Plant nutrient sulfur in the tropics and subtropics. *Adv. Agron.*, 50, 209-269.
- Prabhu, N., Borkar, S., & Garg, S. (2019). Phosphate solubilization by microorganisms: overview, mechanisms, applications and advances. *Advances in Biological Science Research*, 161-176.
- Prasad, R., & Shivay, Y. S. (2018). Sulphur in soil, plant and human nutrition. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 88(2), 429-434.
- Raboy, V., Young, K. A., Dorsch, J. A., & Cook, A. (2001). Genetics and breeding of seed phosphorus and phytic acid. *Journal of plant physiology*, 158(4), 489-497.
- Raffan, S., Oddy, J., & Halford, N. G. (2020). The sulphur response in wheat grain and its implications for acrylamide formation and food safety. *International journal of molecular sciences*, 21(11), 3876.
- Raghothama, K. G. (2005). Phosphorus and plant nutrition: an overview. *Phosphorus: Agriculture and the environment*, 46, 353-378.
- Rasmussen, P. E., & Kresge, P. P. (1986). Plant Response to Sulfur in the Western United States. P357-374. Sulfur in agriculture. American Society of Agronomy. Madison. WI.
- Rausch, C., & Bucher, M. (2002). Molecular mechanisms of phosphate transport in plants. *Planta*, 216(1), 23-37.
- Reddy, V. R. P., Aski, M. S., Mishra, G. P., Dikshit, H. K., Singh, A., Pandey, R., ... & Nair, R. M. (2020). Genetic variation for root architectural traits in response to phosphorus deficiency in mungbean at the seedling stage. *PloS one*, 15(6), e0221008.
- Rodriguez, D., Andrade, F. H., & Goudriaan, J. (2000). Does assimilate supply limit leaf expansion in wheat grown in the field under low phosphorus availability?. *Field Crops Research*, 67(3), 227-238.
- Rodriguez, D., Keltjens, W. G., & Goudriaan, J. (1998). Plant leaf area expansion and assimilate production in wheat (*Triticum aestivum* L.) growing under low phosphorus conditions. *Plant and Soil*, 200(2), 227-240.
- Salame, R., Mishra, U. S., Mohbe, S., Subhash Dotaniya, C. K., Pahade, V., & Dautaniya, R. K. (2020). Influence of Growth and Yield Attributes of Sesame (*Sesamum indicum* L.) by Sulphur and Phosphorus Different Combination Fertilizer Levels under the Rainfed Condition. *Indian Journal of Pure Applied Bioscience*, 8(4), 115-124.
- Scherer, H. W. (2001). Sulphur in crop production. *European Journal of agronomy*, 14(2), 81-111.
- Shivay, S. Y., Prasad, R., & Pal, M. (2014). Effect of levels and sources of sulfur on yield, sulfur and nitrogen concentration and uptake and S-use efficiency in basmati rice. *Communications in soil science and plant analysis*, 45(18), 2468-2479.
- Silva, D. A. D., Esteves, J. A. D. F., Messias, U., Teixeira, A., Gonçalves, J. G. R., Chiorato, A. F., & Carbonell, S. A. M. (2014). Efficiency in the use of phosphorus by common bean genotypes. *Scientia Agricola*, 71(3), 232-239.
- Singh Gahoonia, T., Care, D., & Nielsen, N. E. (1997). Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. *Plant and Soil*, 191(2), 181-188.

- Singh, V., Reddy, M. D., Pandey, G., & Kumar, A. (2020). Effect of different levels of phosphorus on performance of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(3), 363-366.
- Sinha, R. B., Sakal, R., & Kumar, S. (1995). Sulphur and phosphorus nutrition of winter maize in calcareous soil. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 43(3), 413-418.
- Stevenson, F. J., & Cole, M. A. (1999). *Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. John Wiley & Sons.
- Stewart, J. W. B., & Tiessen, H. (1987). Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, 4(1), 41-60.
- Sugiura, H., Sugihara, S., Kamiya, T., Artigas Ramirez, M. D., Miyatake, M., Fujiwara, T., ... & Ohkama-Ohtsu, N. (2021). Sulfur application enhances secretion of organic acids by soybean roots and solubilization of phosphorus in rhizosphere. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1-8.
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L., Beaton, J. D., & Havlin, J. L. (1993). Soil and fertilizer sulfur, calcium and magnesium. *Soil fertility and fertilizers*, 5, 266-303.
- Tisdale, S. L., Reneau Jr, R. B., & Platou, J. S. (1986). Atlas of sulfur deficiencies. *Sulfur in agriculture*, 27, 295-322.
- Tiwari, K. N., & Gupta, B. R. (2006). Sulphur for sustainable high yield agriculture in Uttar Pradesh. *Indian Journal of Fertilisers*, 1(11), 37.
- Torrent, J., & Delgado, A. (2001). Using phosphorus concentration in the soil solution to predict phosphorus desorption to water. *Journal of Environmental Quality*, 30(5), 1829-1835.
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New phytologist*, 157(3), 423-447.
- Wen, Z., Li, H., Shen, J., & Rengel, Z. (2017). Maize responds to low shoot P concentration by altering root morphology rather than increasing root exudation. *Plant and Soil*, 416(1), 377-389.
- Wilhelm Scherer, H. (2009). Sulfur in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(3), 326-335.
- Williams, C. H. (1967). Some factors affecting the mineralization of organic sulphur in soils. *Plant and Soil*, 26(2), 205-223.
- Wissuwa, M. N. I. O., & Ae, N. (1999). Genotypic variation for phosphorus uptake from hardly soluble iron-phosphate in groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Plant and Soil*, 206(2), 163-171.
- Yadav, A. N., Kour, D., Kaur, T., Devi, R., & Yadav, N. (2020). Agriculturally important fungi for crop productivity: current research and future challenges. *Agriculturally important fungi for sustainable agriculture*, 275-286.
- Zhang, Y., Peng, Y. U., Yun-Feng, P. E. N. G., Xue-Xian, L. I., Fan-Jun, C. H. E. N., & Chun-Jian, L. I. (2012). Fine root patterning and balanced inorganic phosphorus distribution in the soil indicate distinctive adaptation of maize plants to phosphorus deficiency. *Pedosphere*, 22(6), 870-877.
- Zhao, F. J., Bilsborrow, P. E., Evans, E. J., & McGrath, S. P. (1997). Nitrogen to sulphur ratio in rapeseed and in rapeseed protein and its use in diagnosing sulphur deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 20(4-5), 549-558.
- Zhao, F. J., Hawkesford, M. J., & McGrath, S. P. (1999). Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *Journal of cereal science*, 30(1), 1-17.

- Zhao, F. J., Hawkesford, M. J., Warrilow, A. A., McGrath, S. P., & Clarkson, D. T. (1996). Responses of two wheat varieties to sulphur addition and diagnosis of sulphur deficiency. *Plant and soil*, 181(2), 317-327.
- Zhao, F. J., McGrath, S. P., Crosland, A. R., & Salmon, S. E. (1995). Changes in the sulphur status of British wheat grain in the last decade, and its geographical distribution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 68(4), 507-514.
- Zhao, F. J., Wu, J., & McGrath, S. P. (1996). Soil organic sulphur and its turnover. In *Humic substances in terrestrial ecosystems* (pp. 467-506). Elsevier Science BV.




