

**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MOLEKÜLER BİYOLOJİ VE GENETİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HIGH-THROUGHPUT METABOLOM
PROFİLLEME YOLUYLA TRİTİKALE'DE
KURAKLIK STRESİNE YANITIN
KARAKTERİZASYONU**

Nagehan GÜL

Danışman: Doç. Dr. Sıgnem ÖNEY BİROL

BURDUR, 2025

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca **Yüksek Lisans Tezi** olarak sunduğum “**High-throughput Metabolom Profillemeye Yoluyla Tritikale’de Kuraklık Stresine Yanıtın Karakterizasyonu**” başlıklı bu tezin;

- Kendi çalışmam olduğunu,
- Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
- Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
- Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
- Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
- Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı, bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

24 / 01 / 2025

(İmza)

Nagehan GÜL

ÖNSÖZ

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam **Doç. Dr. Sığnem ÖNEY BİROL**'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında laboratuvarlarını bana açan Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine teşekkür ederim.

Viyana Üniversitesi Metabolomik Merkezi başkanı Prof.Dr. Wolfram Weckwerth, Dr.Parlak Chaturvedi ve Dr.Arindam Ghatak'a metabolomik analizlerde desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Araştırmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen laboratuvar arkadaşlarım Emine ONGUN ve Hüseyin TORUN'a teşekkür ederim.

0986-YL-24 No'lu proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aşamasında beni her anlamda destekleyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ocak, 2025

Nagehan GÜL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	1
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	2
ÖZET	3
ABSTRACT.....	4
1. GİRİŞ	5
2. GENEL BİLGİLER.....	7
2.1 Bitkilerde Abiyotik Stres	7
2.2 Bitkilerde Biyotik Stres.....	9
2.3 Kuraklık Stresi	9
2.4 Tritikale Hakkında Genel Bilgiler	14
2.5 Kaynak Özetleri	15
3 MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1 Deneylerde Kullanılan Tohumlar	24
3.1.1 Deneyde Kullanılan Tohumların Kuraklık Stres Konsantrasyonlarının Belirlenmesi.....	25
3.2 Morfofizyolojik Analizler.....	27
3.3 Biyokimyasal Analizlerinin Yapılması.....	30
3.3.1 Yaprakların yetiştirilmesi ve örneklerin alınması	30
3.3.2 Prolin Miktarının Belirlenmesi	30
3.3.3 Malondialdehit Aktivitesinin Belirlenmesi.....	31
3.3.4 Süperoksit Dismutaz Aktivitesinin Belirlenmesi	32
3.3.5 Katalaz (CAT) Aktivitesinin Belirlenmesi.....	32
3.3.6 Askorbat Peroksidaz Aktivitesinin Belirlenmesi	33
3.3.7 Total Protein Miktarı Analizi	33
3.4 High-throughput Metabolom Profilleme	35
3.5 İstatiksel Analizlerin Yapılması.....	37
4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	38
4.1 Tritikalede Kuraklık Stresi Uygulamasının Çimlenme Üzerine Etkisi.....	38
4.2 Tritikalede Kuraklık Stresi Uygulamasının Fizyolojik Etkileri.....	40
4.3 Tritikalede Kuraklık Stresi Uygulamasının Biyokimyasal Aktivite Üzerine Etkileri.....	50
4.4 Tritikalede Kuraklık Stresi Uygulamasının Metabolit Sentezi Üzerine Etkileri	58
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Bitkiler abiyotik ve biyotik stres faktörleri	8
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan <i>Triticosecale wittmack</i> tohumları	24
Şekil 3.2. Deneyde kullanılan <i>Triticosecale wittmack</i> tohumlarının yüzey stresilasyonu.....	25
Şekil 3.3. Deneyde kullanılan <i>Triticosecale wittmack</i> çeşitlerinde EC değeri bakımından %50 çimlenme oranını geçen tohumlar	26
Şekil 3.4. Deneyde kullanılan <i>Triticosecale wittmack</i> tohumlarının kuraklık stresi konsantrasyonlarının belirlenmesi	26
Şekil 3.5. Deneyde kullanılan tritikale çeşitlere ait fidelerin 7 günlük morfofizyolojik ölçümlerinin alınması.....	27
Şekil 3.6. Deneyde kullanılan tritikale çeşitlere ait fidelerin koleoptil uzunluğu ve radikula uzunluğu ölçümleri	28
Şekil 3.7. İklimlendirme odasında saksıya aktarılan tritikale fidelerine 7 gün boyunca %24 PEG-6000 ile kuraklık stresi uygulaması	29
Şekil 3.8. Deneyde kullanılan tritikale çeşitlerine ait fidelerin kuraklık stresi uygulaması sonrasında morfofizyolojik ölçümlerin alınması.....	29
Şekil 3.9. Deneyde kullanılan tritikale çeşitlerine ait fidelerin taze yaprak dokuları kullanılarak L-Prolin miktar tayini için kontrol eğrisi çözeltilerinin hazırlanması	30
Şekil 3.10. L-Prolin miktar tayini için elde edilen kontrol (curve) eğrisi (mg/ml)....	31
Şekil 3.11. L-Prolin miktar tayini için örneklerin yüklenmesi.....	31
Şekil 3.12. MDA miktarının tayini için örneklerin 96 kuyucuklu plakaya yüklenmesi	32
Şekil 3.13. Total protein miktarının tayini için elde edilen kontrol çözeltilerinin hazırlanması	34
Şekil 3.14. Total protein miktarının tayini için elde edilen kontrol (curve) eğrisi (mg/ml)	35
Şekil 3.15. Tritikale çeşitlerinin normal ve kuraklık stresi koşulları altında metabolom profillemeye için kullanılan taze yapraklarının 21 günlük gelişimleri.....	35
Şekil 3.16. Tritikale çeşitlerinin normal ve kuraklık stresi koşulları altında metabolom profillemeye için her bir saksıdan 200 mg yaprak dokusu alınması	36

Şekil 4.1. Kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde radikula sayısının karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.2. Kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde radikula uzunluğunun karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.3. Kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde koleoptil uzunluğunun karşılaştırılması.....	43
Şekil 4.4. Kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde taze ağırlığın karşılaştırılması	43
Şekil 4.5. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde bitki boyunun karşılaştırılması	45
Şekil 4.6. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde kök sayısının karşılaştırılması	46
Şekil 4.7. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde kök uzunluğunun karşılaştırılması.....	47
Şekil 4.8. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde gövde çapının karşılaştırılması	47
Şekil 4.9. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde yaprak sayısının karşılaştırılması	48
Şekil 4.10. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde yaprak alanının karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.11. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde taze ağırlığın karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.12. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde malondialdehit miktarının (MDA) karşılaştırılması	51
Şekil 4.13. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde prolin miktarının karşılaştırılması	52
Şekil 4.14. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde SOD miktarının karşılaştırılması.....	53
Şekil 4.15. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde total protein miktarının karşılaştırılması.	54
Şekil 4.16. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde APX aktivitesinin karşılaştırılması.....	55

Şekil 4.17. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde CAD miktarı seviyesinin karşılaştırılması	56
Şekil 4.18. Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin yüksek performanslı metabolom profilinin PCA (Temel Bileşenler Analizi) grafiği	68
Şekil 4.19. Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin yüksek performanslı metabolom profilinin ısı grafiği	71
Şekil 4.20. Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin yüksek performanslı metabolom profilinin temel bileşen analizi yük değerleri ısı grafiği (PCA Loadings Heatmap)	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Triticale ($\times$ <i>Triticosecale wittmack</i>) çeşitlerinde 7 günlük çimlenme yüzdesi oranları ile kuraklık stresi (PEG-6000) uygulaması konsantrasyonunun belirlenmesi.....	38
Çizelge 4.2. Triticale ($\times$ Triticosecale wittmack) çeşitlerinde kuraklık stresi (PEG-6000) ve kontrol gruplarında çimlenme ve koleoptil yüzdesinin belirlenmesi...39	
Çizelge 4.3. Triticosecale Wittmack çeşitlerine ait 7 günlük petride kuraklık stresi uygulamasının fizyolojik karşılaştırmaları.	40
Çizelge 4.4. Stresli ve stressiz koşullar altında kuraklık stresi uygulamasına maruz bırakılan <i>Triticosecale wittmack</i> çeşitlerine ait 21 gün saksılardaki fidelerin fizyolojik karşılaştırmaları.....	44
Çizelge 4.5. Stresli ve stressiz koşullar altında kuraklık stresi uygulamasına maruz bırakılan Triticosecale wittmack çeşitlerine ait 21 gün saksılardaki fidelerin biyokimyasal aktivite karşılaştırmaları.....	50
Çizelge 4.6. Stresli ve stressiz koşullar altında kuraklık stresi uygulamasına maruz bırakılan Triticosecale wittmack çeşitlerine ait 21 gün saksılardaki fidelerin yüksek performanslı metabolom profili karşılaştırmaları.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat
μM	: Mikromolar
μL	: Mikrolitre
mM	: Milimolar
ABA	: Absisik asit
AsA	: Askorbat
ACC	: 1-aminosiklopropan-1-karboksilik asit
APX	: Askorbat peroksidaz
CAT	: Katalaz
CO₂	: Karbondioksit
ETC	: Elektron taşıma zinciri
GSH	: Glutasyon
H₂O	: Dihidrojen monoksit
H₂O₂	: Hidrojen peroksit
JA	: Jasmonik asit
MDA	: Malondialdehit
O₂•	: Süperoksit radikali
PEG	: Polietilenglikol
PM	: Primer Metabolit
POD	: Peroksidaz
ROT	: Reaktif oksijen türleri
SA	: Salisilik asit
SM	: Sekonder Metabolit
SOD	: Süperoksit dismutaz

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

High-throughput Metabolom Profilleme Yoluyla Triticale’de Kuraklık Stresine Yanıtın Karakterizasyonu

Nagehan GÜL

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Moleküler Biyoloji ve Genetik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sığnem ÖNEY BİROL

Ocak, 2025

Kuraklık stresi, bitki fenotipinde fizyolojik, biyokimyasal ve metabolik hasarlara neden olan en önemli stres faktörlerinden biridir. Bu çalışmada, çoğunluğu Türkiye ve İtalya’da yetiştirilen 13 farklı tritikale çeşidinin kuraklık stresine tolerans mekanizması fizyolojik, biyokimyasal ve metabolomik parametreler açısından değerlendirilmiş ve ebeveynleri buğday (♀) ve çavdar (♂) ile karşılaştırmalı olarak ilişkilendirilmiştir. Fizyolojik açıdan çimlenme ve koleoptil yüzdesi, radikula ve koleoptil uzunluğu (cm), radikula sayısı, yaprak çapı (mm), bitki boyu (cm), taze ağırlık (g), yaprak sayısı, yaprak alanı (cm²), gövde çapı (cm) ile biyokimyasal açıdan prolin, MDA, antioksidan enzim bakımından SOD, CAT, APX ve stresle ilişkili metabolitlerin belirlenmesi açısından da metabolomik profillemesi ortaya konulmuştur. Stres uygulanmayan grupla karşılaştırıldığında kuraklık stresinin fizyolojik parametreler üzerine olumsuz etkisi olduğu bulunmuştur. Bitki abiyotik strese maruz kaldığında, antioksidan adı verilen enzimlerinin seviyeleri artmıştır. Kuraklık stresi altındaki tüm çeşitlerde toplam protein içeriğine ek olarak prolin, MDA, SOD, CAT ve APX aktivitelerinde de artış görülmüştür. Triticale çeşitlerinin kuraklık stresi altındaki metabolomik profillemesi sonucunda 45 metabolit saptanmıştır. Sükroz, Fruktoz, Gulutamin, L- Asparajin, L-(-)-Malik asit, L- Alanin, Serine, Aspartik asit, D-Glutamik asit, Galaktoz, sitric asit, Glukoz, Asparjin , L- Proline, Glutamik asit, Maltoz, Meliboz ve Metiyonin metabolitleri kuraklıkla ilişkili bulunmuştur.

Sonuç olarak, tüm bulgular değerlendirildiğinde kuraklık stresinin olumsuz etkilerini yenmede en başarılı çeşitler Karma-2000, Alperbey ve Mikham-2002 iken en hassas çeşit Tatlıcak-97 olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Abiotik stres, antioksidan aktivite, iklim değişikliği, sürdürülebilir tarım, metabolomik

Hazırlanan bu Yüksek Lisans tezi Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 0986-YL-24 proje numarası ile desteklenmiştir.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Characterization of Drought Stress Response via High-throughput Metabolome Profiling in Triticale

Nagehan GUL

Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Molecular Biology and Genetics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Signem ONEY BIROL

January, 2025

Drought stress is one of the most significant stress factors causing physiological, biochemical, and metabolic damage to plant phenotypes. In this study, the drought stress tolerance mechanisms of 13 different triticale varieties, primarily cultivated in Turkey and Italy, were evaluated in terms of physiological, biochemical, and metabolomic parameters and were comparatively related to their parents, wheat (♀) and rye (♂). Physiological parameters such as germination and coleoptile percentage, radicle and coleoptile length (cm), radicle number, flag leaf diameter (mm), plant height (cm), fresh weight (g), leaf number, flag leaf area, and stem diameter (cm) were assessed. Biochemical parameters, including proline, MDA, and antioxidant enzymes like SOD, CAT, and APX, were analyzed, along with metabolomic profiling to identify stress-related metabolites. Compared to the group not subjected to stress, drought stress was found to have adverse effects on physiological parameters. When exposed to abiotic stress, the levels of antioxidant enzymes increased in the plants. Under drought stress, all varieties showed an increase in total protein content as well as proline, MDA, SOD, CAT, and APX activity. Metabolomic profiling of triticale varieties under drought stress identified 45 metabolites, including sucrose, fructose, glutamine, L-asparagine, L-(-)-malic acid, L-alanine, serine, aspartic acid, D-glutamic acid, galactose, citric acid, glucose, asparagine, L-proline, glutamic acid, maltose, melibiose, and methionine, which were found to be associated with drought.

In conclusion, among all varieties, **Karma-2000**, **Alperbey**, and **Mikham-2002** were determined to be the most successful in overcoming the adverse effects of drought stress, while **Tatlıcak-97** was identified as the most sensitive variety.

Key Words: Abiotic stress, antioxidant activity, climate change, sustainable agriculture, metabolomic

1. GİRİŞ

İklim değışikliği, insan ve insan faktörü dışında kalan eylemler nedeniyle uzun bir zaman dilimi boyunca iklimde meydana gelen değışiklik olarak tanımlanmaktadır (Chandio vd., 2021). 1850-1982 yılları arasında kara ve okyanus yüzeyi sıcaklıkları her 10 yılda ortalama 0,06 °C artmakta iken, 1982 yılından itibaren her 10 yılda ortalama 0,20 °C artış göstererek geçmişe göre yaklaşık üç kat artış göstermektedir. Küresel ısınma, insanların sosyal gelişimine yönelik en büyük tehditlerden biri olarak gösterilmektedir. İklim değışikliğinin insan etmeni kaynaklı hız kazanması hızlı nüfus artışı, yüksek miktarda sera gazı emisyonu ve fosil yakıtların tüketimi küresel ısınmanın temel itici güçleri olarak belirlenmiştir. İnsanın varoluşunun temeli olarak ortaya çıkan tarımsal üretim; sıcaklık, yağış, rüzgâr hızı gibi çevresel faktörler ile bitki zararlıları ve bitki hastalıkları ürün verimini ve kalitesini etkileyen faktörler iklim değışikliğinden hızla etkilenmektedir (Yuan vd., 2024). Tahıllar, tarımın başlangıcından bu yana (MÖ 10.000) temel gıda maddesi olarak kullanılmakta ve küresel nüfusun kalori ihtiyacının %50'sinden fazlasını karşılamaktadır (Ahmar vd., 2023; Mallikarjuna vd., 2022; Vishnoi ve Goel 2024). Yeşil Devrimin başlangıcından bu yana biyoteknolojik ilerlemeler ışığında, iklim değışikliğinin olumsuz etkileri sonucunda ortaya çıkan ürün veriminin artırılması birincil araştırma konuları olarak araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır (Taniushkina vd., 2024).

Bitki stresi, bir bitkinin metabolizması, büyüme ve gelişimini etkileyebilecek herhangi bir olumsuz durum ya da madde olarak tanımlanmaktadır. Bu stresler biyotik ve abiyotik stres olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar: biyotik stres; böcekler, otçullar, nematodlar, mantarlar, bakteriler ve virüsler gibi biyotik faktörlerin sebep olduğu stresler iken, abiyotik stres; kuraklık, tuzluluk, sıcaklık, ultraviyole radyasyon, tuzluluk, sel, kuraklık, ağır metaller gibi cansız etmenlerin neden olduğu stres olarak tanımlanmaktadır (Bolaşi Umar vd., 2022). Stresin bitki büyümesi ve üretkenliği ile yakından ilişkili olan bir dizi morfolojik, biyokimyasal ve fizyolojik süreç üzerinde olumsuz etkisi bulunmaktadır. Bitkilerin, yaşam döngüleri boyunca maruz kaldıkları stres etkenine gösterdikleri tepki, maruz kaldıkları stresin sıklığı, şiddeti ve bitkinin gelişim aşamasına bağlı olarak (Álvarez ve Acosta-Motos, 2023) gen ifadesi, hücre metabolizma, büyüme prosesleri ile ürün veriminde meydana gelen değışiklikler aracılığıyla yanıt olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca streslerle bağlantılı fizyolojik, biyokimyasal ve ekolojik eylemleri tanımlamak, bitkinin strese karşı duyarlılığını geliştirmesine yardımcı mekanizmalar

ortaya koymak, stres ile mücadele stratejilerinin geliştirilmesinde çok önemlidir (Verma vd., 2022).

Dünya genelinde, kuraklık tarımsal üretimi kısıtlayan en önemli faktörlerden biri olup, ürün verimini olumsuz etkilemektedir. Bitkiler kuraklık stresine; morfolojik, anatomik, biyokimyasal, fizyolojik ve moleküler seviyede yanıtlar vermek suretiyle kuraklık tepki mekanizmalarını harekete geçirmektedirler (Yang vd., 2021). Spesifik olarak, kuraklık stresi ile karşılaşan bitkide öncelikle büyüme ve gelişme parametrelerinde, klorofil ve çözünür protein miktarında azalma meydana gelirken prolin ve şeker gibi osmolitlerin miktarında artış gözlemlenmektedir (Bogati ve Walczak, 2022). Aynı zamanda bitkilerde reaktif oksijen türleri (ROT) üretimini de tetikleyerek lipid peroksidasyonuna ve oksidatif hasara neden olmaktadır. ROT'ni temizlemek ve oksidatif hasarı azaltmak için askorbat peroksidaz, katalaz ve süperoksit dismutaz gibi antioksidan enzimlerin aktivitesinin artırılması (Shah vd., 2021) suretiyle bitkiler strese karşı direnç göstermek ya da uyum sağlamak için savunma mekanizmalarını kullanarak metabolik değişimlere uğramaktadırlar (Zahedi vd., 2021). Bir bitkinin kimyasal savunma tepkisi mekanizması tarafından SM'lerin çoğunun artan sentezinin, strese karşı dirençleriyle bağlantılı olduğuna ve bunun, farklı bitki taksonomik grupları tarafından üretilen SM'lerin türü ve miktarındaki çeşitliliğin bir açıklaması olabileceği düşünülmektedir (Rahman vd., 2023). Bitki metabolizmadaki bu tür adaptasyonlar, bitki stres direncine yol açan önemli mekanizmalar olabilir ve tür ve genotipe özgü fenolik, flavonoid, terpenoid ve azot içeren bileşiklerin üretimini içerir (Rahman vd., 2023; Zahedi vd., 2021).

2. GENEL BİLGİLER

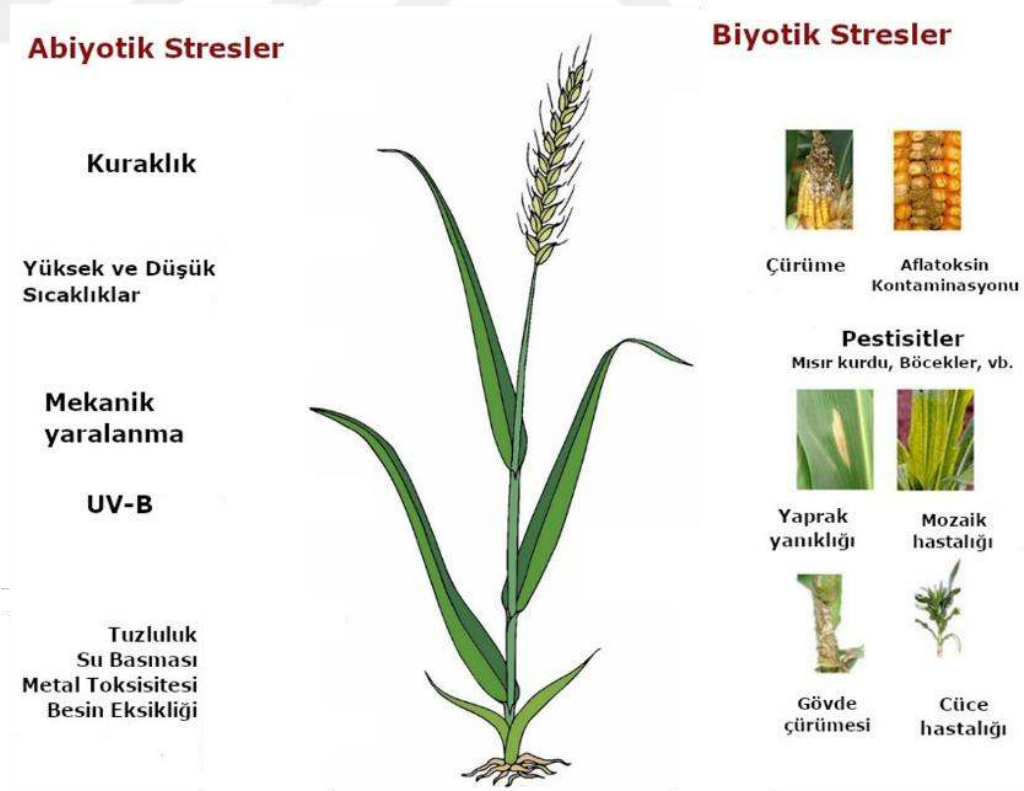
2.1 Bitkilerde Abiyotik Stres

Bitkiler sesil yaşam formları gereği yaşam periyotları boyunca maruz kaldıkları stresin olumsuz etkileri ile başa çıkmak ya da bunlardan kaçınmak için spesifik mekanizmalar geliştirmektedirler. Abiyotik stres etmeni olan kuraklık, tuzluluk, güneş radyasyonu (aşırı ışık veya yüksek ışık yoğunlukları, UV ışığı), aşırı sıcaklıklar (ısı ve düşük sıcaklık/donma stresi) ve kirleticiler (ağır metaller, herbisitler) ile temel makro ve mikro besinlerin düşük konsantrasyonları veya bu besinlerin zayıf emilimine yol açan koşullar bitki bünyesinde algılanmakta hatta bazen bitkiler, iki ya da daha fazla abiyotik stres faktörünün olumsuz etkileri ile başa çıkmak zorunda kalmaktadırlar (Bolaji Umar vd., 2022; Gechev ve Hille, 2012). Bu olumsuz koşullar bitki bünyesinde morfolojik, fizyolojik ve genetik açıdan adaptif mekanizmalar yoluyla yanıt olarak ortaya çıkmaktadır (Gechev ve Hille 2012; Poonam vd., 2017). Bu stresler uzun süre bitki bünyesinde etki gösterdiğinde, bitkinin büyümesi ve verimliliği büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu da bitkide, sürgün ve kök büyümesinin azalması, zayıf anter açılması, polen canlılığının kaybı, çiçek dökülmesinin artması, çiçek döllenmesinin azalması, tohum deformasyonu ve dane dolma sürelerinin kısalması gibi çeşitli morfolojik değişikliklere neden olurken, yaprak senesensi, klorozis, nekrozis, yanma ve dökülme gibi bitki büyümesi üzerindeki olumsuz durumların ortaya çıkmasına katkıda bulunmaktadır. Bitkiler bu zararlı etkilere karşı koymak için stoma düzenlemesi, ABA sinyal yolu, iyon homeostazı ve ozmotik ayarlama gibi çeşitli adaptasyon ve tolerans mekanizmaları geliştirmek suretiyle tepki göstermektedirler. Araştırmacılar, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler müdahalelerin rollerini ortaya çıkararak ürünlerin abiyotik streslere karşı dayanıklılığını artırmayı ve böylece ani küresel iklim değişikliği karşısında küresel gıda güvenliğini korumayı amaçlamaktadırlar (Wani, 2023). Bu da bitkilerin stres koşullarını nasıl algıladıkları ve nasıl yanıt verdikleri ile uyum sağladıkları (hem doğal hem de antropojenik ortamlarda) hakkında daha fazla bilgi edinmenin önemini vurgulamaktadır (Mareri vd., 2022).

Bitkilerin abiyotik stresle mücadelesinde gen ifadesinden fizyolojiye, bitki mimarisinden birincil ve ikincil metabolizmaya kadar ki yanıtı bitkilerin olumsuz koşullara tolerans göstermesini ve/veya uyum sağlamasına desteklemekle birlikte, bu yanıtın karmaşıklığı, stresin süresi ve yoğunluğu, bitki genotipi, farklı streslerin kombinasyonu, maruz kalan doku ve hücre tipi ve bitkilerin stresi algıladığı gelişim

aşamasına bağlı olarak da değişiklik göstermektedir (Mareri vd., 2022). Bu durum, bitkinin strese karşı toleransını artırırken, stres koşulları altında hayatta kalma mücadelesine yardımcı olan epigenetik düzenlemeler, biyokimyasal, morfolojik ve moleküler modifikasyonlar suretiyle bitkinin evrimsel süreçte varlığını sürdürmesine destek olmaktadır (Sharma vd., 2022). Bunun yanı sıra, bitkinin karşılaştığı stresle mücadelesinde transkripsiyonel düzenlemeler ile ortaya koyduğu savunma mekanizmalarının tam olarak anlaşılması, artan dünya nüfusunun besin ihtiyacının karşılanması amacıyla hedeflenen üreme kapasitesi ve tarımda sürdürülebilirliğe yönelik uygulamaları da destekleyecektir.

Bitkilerin abiyotik strese uyum sağlama yeteneklerini artırmak için hormon modülasyonu, bitki enzimatik sistem aktivasyonu ve stres gen ifadesi dahil olmak üzere çok yönlü bir stratejiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, tahıl ürünlerinin abiyotik strese nasıl tepki verdiğini anlamak oldukça önemlidir. Abiyotik stresin önemli özelliklerini ve bunların altında yatan fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler temelleri (genetik, epigenetik, transkriptomik ve metabolomik) anlamak, abiyotik strese dayanıklı ürünler geliştirme çabasındaki bilimizi artıracaktır (Zhao vd., 2023).



Şekil 2.1. Bitkiler abiyotik ve biyotik stres faktörleri (Bolaji Umar vd., 2022)

2.2 Bitkilerde Biyotik Stres

Bitkiler, mantarlar, virüsler, bakteriler, nematodlar ve böcekler gibi çeşitli canlı organizmaların neden olduğu biyotik streslere maruz kalmaktadırlar. Bu biyotik stres etmenleri, tarımsal verimi düşüren çeşitli hastalıklara, enfeksiyonlara ve ürün kayıplarına neden olmaktadır. Bitki paraziti nematodlar bitki hücrelerinin içerikleriyle beslenirken, çoğunlukla toprak kaynaklı hastalıklara neden olmakta ve kök sistemini etkilemek suretiyle, beslenme yetersizliğinin belirtileri olan solma ve bodurluğa sebep olmaktadır. Virüsler, bitkilerde sistemik hasara sebep olmak kaydıyla boy kısalığı, klorozis gibi morfolojik ve fizyolojik parametreleri etkilemektedirler (Bolaji Umar vd., 2022; Mangena ve Adejumo, 2023).

2.3 Kuraklık Stresi

Bitkilerde kuraklık, bitki verimliliğini etkileyen en ciddi çevresel streslerden biri olarak tanımlanmaktadır. Bitki gövdesinin taze biyokütlesinin yaklaşık %80-95'i, bitki büyümesi, gelişimi ve metabolizmasının birçok yönü de dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik süreçlerde hayati bir rol oynayan sudan oluşmaktadır. Kuraklığın tarımdaki etkileri, su kaynaklarının tükenmesi ve endişe verici dünya nüfusu artışından kaynaklanan artan gıda talebi nedeniyle, kuraklığın öngörülemez doğası, yağışın, buharlaşmanın ve rizosfer etrafındaki su tutma kapasitesinin eşitsiz ve güvenilmez dağılımı gibi çeşitli faktörlere de bağlı değişimsel parametreler ile ortaya çıkmaktadır.

Bitkilerin farklı moleküler, biyokimyasal, fizyolojik, morfolojik ve ekolojik özellikleri ve süreçleri kuraklık stresi koşulları altında bozulmakta ve bitki verimi ve kalitesi su eksikliği ortamlarında olumsuz etkilenmektedir (Rahman vd., 2023). Bitkinin büyüme aşamaları, yaş, bitki türü ve kuraklığın şiddeti ile maruz kalan süre bitkinin kuraklığa verdiği tepkileri etkileyen temel faktörleri kapsamaktadır. Kuraklığa karşı direnç mekanizması ise bitkinin genetik yapısının kurağa adaptasyonuna göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle bitkiler kaynak kullanımını azaltma ve kuraklık gibi olumsuz çevre koşullarıyla başa çıkmak için büyümelerini düzenleme yeteneğine sahiptirler. Moleküler düzeydeki stoma düzenlemesi, iyon taşıma kapasitesinin geliştirilmesi, transkripsiyonel aktiviteler ve ABA sinyalleme ile ilişkili çeşitli sinyal yolları, kuraklık stresi karşısında bu tepkileri düzenlemekten sorumludur (Seleiman vd., 2021).

Kuraklık stresi karşısında direnç, farklı türde fizyolojik ve moleküler ağları ve henüz tam olarak açıklanıp ele alınamamış tepkileri içeren karmaşık bir süreçtir. Kuraklık stresi,

diğer çevresel streslerin çoğuna benzer şekilde, oksijen radikallerinin üretimi ve detoksifikasyonu arasındaki dengenin bozulması sonucu dolaylı olarak bitki bünyesinde oksidatif hasar ile ortaya çıkmaktadır. Böyle bir durumda bitkilerdeki savunma sistemleri ve strese direnç mekanizmaları aktive edilerek oksijen radikallerinin daha yüksek detoksifikasyonunu tetiklenmekte ve bitki hücrelerindeki antioksidanların içeriği, ilgili genlerin ifade seviyelerinin farklılaşması sonucu artmaktadır (Saed-Moucheshi vd., 2021). Bu sebeple, çok sayıda genetik yolun tanımlanması ve ayrıca yüksek düzeyde kuraklığa dayanıklılık sağlayabilecek su stresine tolerans stratejilerinin tanınması oldukça önemlidir.

Kuraklık, tohumların çimlenmesi de dahil olmak üzere büyüme döngüsünün her aşamasında bitkileri etkileyebilmektedir. Su eksikliği ya da kuraklık çimlenmeyi azaltmak suretiyle, fide gelişimini sınırlandırarak bitkide büyümeyi engellemektedir (Khan vd., 2019). Bitki boyu üzerinde meydana gelen azalma ise kuraklık koşullarında hücre genişlemesinin azalması, yaprak dökülmesinin artması ve mitozun sekteye uğramasında kaynaklanmaktadır. Kuraklık stresi altında ACC adı verilen ABA öncülünün uyarılması sonucu kök büyümesinin engellenmesi, yaprak alanı ve yaprak sayısının azalmasının yanı sıra, stoma sayısının azalması, yaprakların kutikula kalınlığının artması, kıvrılma ve katlanmanın artması ve mumsu tabakanın oluşumu hem yapraklardan hem de köklerden su kaybını önlemek için geliştirilmiş adaptasyonlar olarak ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, bitki fotosentezini ve verimini doğrudan etkileyen yaprak alanı değişimi, kuraklık stresi altında bitki yapraklarında en kolay gözlemlenen özelliklerden biridir. Sonuç olarak, ABA fitohormonu, stoma kapanmasını düzenleyerek ve yapraklarda strese duyarlı gen ekspresyonunu aktive ederek kuraklık stresine karşı dirence aracılık ederek terlemedeki azalmayı etkilemektedir (Bogati ve Walczak, 2022).

Bitkisel dokularda su stresi, ROT'nin aşırı oluşumuna neden olmakta ve bu durum hücresel yapı ve metabolizma üzerinde zararlı etkiler ile sonuçlanmaktadır. Yüksek seviyede sentezlenen ROT'ni süpürmek için bitkiler, SOD, AsA, CAT, POD ve GSH gibi enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan sistemler geliştirmiştir. Çalışmalar, antioksidan enzim aktivitesinin, bitkinin kuraklık stresi ile mücadelesindeki direnci ile ilişkili olduğunu belgelemiştir (Bor vd., 2003; Demiral ve Turkan, 2005; Gupta vd., 2014; Türkan vd., 2005). Süperoksit radikalleri (O_2^-), elektron donörleri olarak çeşitli substratlar kullanarak SOD tarafından hidrojen peroksit (H_2O_2) dönüştürülür. POD, H_2O_2 'i suya indirger; askorbat H_2O_2 'yi suya indirger, CAT H_2O_2 'yi oksijene ve suya dismutazla dönüştürür. Prolin, inorganik iyonlar ve şeker gibi metabolitler, ozmotik

potansiyelin düzenlenmesi için bitkilerde birikmek suretiyle kuraklık stresi altındaki bitki bünyesinde ortaya çıkar (Khan vd., 2019).

Bitki metabolizması, bitki bilimleri ve sistem biyolojisinin hızla ilerleyen bir alanı olmakla birlikte, bitki doku ve hücrelerindeki küçük moleküllerin (metabolitlerin) kapsamlı analizlerini içermektedir. Genel olarak bu metabolitler primer ve sekonder metabolitler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Birincil (primer) metabolitler, bitkinin fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri boyunca büyüme ve gelişmesinden sorumlu iken ikincil (sekonder) metabolitler ise bitkinin çevreyle hassas bir denge kurarak stres koşullarında hayatta kalabilmesinde görev almaktadırlar (Hong vd., 2016). Farklı bitki türlerinde yaklaşık 100.000 sekonder metabolitin rapor edildiği ve nitrojen içeren bileşikler, terpenler, tiyoller ve fenolik bileşikler olmak üzere birden fazla gruba sınıflandırıldığı tahmin edilmektedir (Patel vd., 2021).

Bitkisel organizmaların biyolojik süreçlerini inceleyerek, büyüme ve gelişmelerini ve bunların çevresel değişikliklere tepkileri hakkında fikir sahibi olmayı destekleyen genomik, transkriptomik, proteomik ve metabolomik gibi çeşitli omik teknolojilerinin kullanılması bitkiler hakkında detaylı bilgi edinilmesi süreçlerinde devrim niteliği taşımaktadır ve günümüz iklim değişikliği senaryolarında ideal genotiplerin geliştirilmesine katkıda bulunma potansiyeline sahip olmuştur (Barh vd., 2015; Kanai vd., 2022; Krishnappa vd., 2021; Munshi ve Sharma, 2018).

Metabolomik, herhangi bir organizmada bulunan metabolit havuzunun bileşimi hakkında yararlı bilgiler elde etmek için geniş kapsamlı, hassas ve pratik bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Bitkilerde metabolomik düzenlemenin araştırılması, çok sayıda metabolitin üretimi yoluyla çevresel streslere karşı adaptasyon, iklimlendirme ve savunma tepkilerini anlamak için oldukça önemlidir. Üstelik metabolomikler bitkilerin fenotiplendirilmesinde kolaylıkla uygulanabilir ve bu nedenle, üstün kaliteli yeni nesil ürün geliştirilmesinde genom düzenleme programlarında kullanıma potansiyeli yüksektir (Patel vd., 2021). Metabolomik verilerinin diğer omik verilerle (genomik, transkriptomik ve proteomik) entegre edilmesi, bitki biyolojisine daha kapsamlı bir bakış açısı sağlayarak araştırmacıların organizmalar içindeki karmaşık etkileşimleri anlamalarına da destek olmaktadır (Manickam vd., 2023).

Metabolomik çalışmanın performansı, her bir metaboliti kapsamlı bir şekilde tanımlamak ve ölçmek için kullanılan metodolojilere ve araçlara dayanmaktadır. Gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi (GC-MS), sıvı kromatografisi kütle spektroskopisi (LC-MS), kılcal elektroforez-kütle spektrometrisi (CE-MS), fourier dahil olmak üzere

kütle spektrometrisi (MS) bazlı yöntemler gibi çeşitli entegre teknolojiler ve metodolojiler bitki ekstraktlarının oldukça karmaşık karışımlarının büyük ölçekli analizi için transform iyon siklotron rezonans-kütle spektrometresi (FTICR-MS), matris destekli lazer desorpsiyon/iyonizasyon (MALDI), iyon hareketlilik spektrometrisi (IMS) ve nükleer manyetik rezonans (NMR) kullanılmaktadır (Patel vd., 2021). Bitkilerin gelişim süreçleri boyunca karşılaştıkları stres bitki bünyesinde hem transkripsiyonel hem de transkripsiyon sonrası seviyelerde bir dizi adaptif değişiklik şeklinde ortaya çıkmaktadır bu da homeostaziyi sürdürmek için düzenleyici ağların yeniden yapılandırılmasına yol açmıştır (Hong vd., 2016).

Çevresel stres ile karşılaşan bitkide, ilk aşamada stres bitki tarafından algılanır ve bir sinyal yolağı ağını harekete geçirir, daha sonraki aşamalarda, ilk aşamada etkinleştirilen sinyal iletim yolları, homeostazi yeniden düzenleyen veya yeni bir duruma ulaşan farklı proteinlerin ve bileşiklerin üretimini tetikler. Metabolomik açısından bakıldığında, durum bitkide en az üç farklı tipte bileşik ile sonuçlanır:

- (1) antioksidanlar veya ozmoprotektanlar gibi strese alışma sürecinde görev alan bileşikler;
- (2) büyüme koşullarında meydana gelen değişiklikler nedeniyle normal homeostazın bozulması sonucu hücrelerde ortaya çıkan stres yan ürünleri,
- (3) alışma tepkisine aracılık etmede rol oynayan sinyal iletim molekülleri (Shulaev vd., 2008).

Bitki reseptörleri stres sinyalleri tarafından uyarıldığında, strese duyarlı genlerin ekspresyonu aktive edilmektedir ve ardından özel metabolitler (özellikle bazı ikincil metabolitler) çevresel streslere uyum sağlamak için biyosentezlenmektedirler. Bitkilerin çevresel bozulmalara karşı metabolik tepkilerinin hızlı kalitatif ve kantitatif analizleri, yalnızca bitkilerdeki abiyotik ve biyotik streslere verilen fenotipik tepkiyi tanımlamamıza ve strese toleranslı bireyleri taramamıza değil, aynı zamanda bitkinin strese karşı tepkisinin altında yatan genetik ve biyokimyasal mekanizmaları ortaya çıkarmamıza da yardımcı olmaktadır. Strese dayanıklı/toleranslı bitkilerin gelecekteki genetik mühendisliği için bitki plastisitesini daha iyi anlamak için son derece önemlidir (Hong vd., 2016). Ancak bu yaklaşımlar sınırlı veri sağladığından dolayı, biyolojik süreci ve farklı koşullar altındaki işlevleri derinlemesine ve kapsamlı bir şekilde anlamamıza yardımcı olan en önemli tekniklerden biri metabolomik profillemeye olarak gösterilmektedir (Niinemets, 2015; Ashrafi vd., 2018).

Dünyanın birçok bölgesinde tarım, küresel iklim değişikliğinin neden olduğu yağış düzenindeki değişiklikler ve artan nüfus ve sanayi ile rekabet nedeniyle kuraklıktan daha fazla etkilenmektedir. Yetersiz arazi kaynaklarında tarımsal verimliliğin artırılması için olumsuz çevresel streslere karşı daha yüksek ürün veriminin sağlanması önemlidir. Kuraklık stresi, serbest radikalleri (süperoksit radikalleri, alkoksi radikalleri ve hidroksil radikalleri) ve radikal olmayanları (tekli oksijen ve hidrojen peroksit) içeren ROT'nin uyarılmasına neden olmaktadır. Bunlar çok toksik ve reaktiftir ve proteinlere, karbonhidratlara, lipitlere ve DNA'ya zarar vererek hücrel homeostazisin bozulmasına neden olmaktadır. Bitki boyunu, kanopiyi, kök gelişimini ve yaprak alanı indeksini, ozmotik potansiyeli, stoma iletkenliğini, karboksilasyon verimliliğini, fotosentez hızını, basınç potansiyelini ve terleme oranını ciddi şekilde etkilemektedirler. Bu nedenle, kuraklık stresi dünya çapında ürün verimliliği üzerinde zararlı bir etkiye neden olmakta ve sürdürülebilir tarım için ciddi bir risk oluşturmaktadır. Ancak bitkiler kuraklık stresine yanıt olarak çeşitli morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve fenolojik değişiklikler geçirmektedirler. Bu değişiklikler, hücrel biyosentez ve bozunma faaliyetleriyle sonuçlanan bitkilerin transkriptom, proteom ve metabolomunun modifikasyonunu içermektedir. Bitkilerde, suyun sınırlı olduğu koşullar altında bitkinin tepkisini anlamak, bitkide kuraklık toleransının artırılmasının da yolunu açacaktır (Yadav vd., 2021).

Kuraklık stresi altındaki bitkilerde biriken en önemli metabolitler arasında fitohormon ABA, triptofan, fenilalanin, valin, lösin, tirozin, sakaropin gibi amino asitler, prolin ve 2-aminoadipat, 4-aminobütanoik asit (GABA) ve organik asitler yer almaktadır. Triptofan aminoasidinin birikiminin ise ozmotik düzenleme ve ROT süpürmede önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir (Bogati ve Walczak, 2022).

Birkaç bitki metaboliti, ozmolitler ve ozmoprotektanlar olarak hareket ederek tuz, kuraklık ve suyun sert stresinin etkisini azaltmaya yardımcı olabilmektedir. Bu tür metabolitlere örnek olarak dimetilsülfoniopropionat (DMSP) ve glisin betain; sakaroz, trehaloz ve fruktan gibi şekerler; prolin ve ektoin gibi amino asitler ve polioller, sorbitol ve mannitolün bazı metabolitleri verilmektedir. Bitkilerde, epikutikuler mum olarak bilinen çok çeşitli mumsu tabakalar, su kıtlığı sırasında su dengesini korur ve hasara neden olan etkenlerle karşılaşmak için mekanik bir durdurma görevi görmektedir. Ek olarak, askorbik asitler, glutamin, alfa-tokoferol, antosiyaninler ve karoten, oksidatif stres sırasında üretilen hareketli oksijenin ara maddelerini toplayarak bitki dokularını bitkideki homeostaziye korumaktadır (Kumar vd., 2021).

Bunun yanında, bitkinin savunma sistemi fitoaleksinler üretmek, ortak fenilpropanoid yolunu uyarmak ve lignin biyosentezini üretmekten sorumludur. Ayrıca, salisilik asit ve metil salisilat, metil jasmonat ve jasmonik asit gibi fitokimyasallar ve hormonlar ve stres nedeniyle oluşan diğer küçük moleküller, çevresel streslere karşı önemli bir rol almaktadır. Bunların hepsi ayrıca direnç sistemini ve uyum tepkilerini uyarak sinyal bileşikler olarak da işlev görebilmektedir. Bitkilerin savunma sistemleri ozmotik düzenleme, şekerler, amino asitler, polioller ve glisin betain gibi uyumlu çözünenlerin biriktirme görevini üstlenmektedir. Bu kimyasal bileşikler, hücre turgorunu sürdürmede ve hücre zarları ile proteini stabilize etmede önemli göreve sahiptirler (Razzaq vd., 2019; Manickam vd., 2023).

Kuraklık stresi altında ikincil metabolitlerin biyosentezi çevresel faktörler tarafından düzenlenmektedir. İkincil metabolitler, alkaloidler (siyanojenik glikozitler, glukozinolatlar, vb.), fenolik bileşikler (tanenler, flavonoidler, ligninler) ve terpenler (terpenoidler veya izoprenoidler) gibi azot içeren metabolitler dahil olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadırlar. İkincil metabolit yolları arasında mevalonik asit, şikimik asit, fenilpropanoik asit ve metilerytritol fosfat bulunmaktadır. Fenilalanin amonyak-liyaz (PAL), 4-kumaroil CoA ligaz (4CL) ve kumarat-4-hidroksilaz (C4H) dahil olmak üzere fenilpropanoid yolunun temel enzimleri stres koşullarından etkilenmektedirler. Ek olarak, kuraklık kaynaklı uçucu bileşikler de bitkilerde kuraklık stresi azaltıcı işlevleri aktive etmek üzere dokuları uyatabilmektedirler (Razzaq vd., 2019; Salam vd., 2023).

2.4 Tritikale Hakkında Genel Bilgiler

Tritikale ($\times$ *Triticosecale* Wittmack), buğday (*Triticum* spp.) ve çavdarın (*Secale cereale*) melezlenmesiyle geliştirilen, laboratuvar kültürü, kendine tozlaşan bir tahıl türüdür. Tritikale ($\times$ *Triticosecale* Wittmack), ilk olarak 19. yüzyılda İskoç botanikçi Alexander Stephen Wilson tarafından tanımlanmıştır. Bu melezlemeyle oluşturulan genotip, başlangıçta $x = 7$ temel sayıya sahip, AABBDDRR genetik yapısındaydı. Zamanla, farklı ploidi seviyelerine ve kromozomal yapıya sahip farklı tritikale çeşitleri geliştirilmiştir ve şu anda, Poaceae familyasına ait kültüre edilmiş bir hekzaploid tritikale, AABBRR genomu ile $2n = 6x = 42$ genomik yapısını içermektedir (Bielski vd., 2020).

Tritikale türünü geliştirmenin ilk amacı, buğdayın üstün agro-morfolojik ve kalite özellikleri ile çavdarın abiyotik ve biyotik streslere karşı direnç özelliklerini bir araya getirecek yeni bir tahıl ürünü geliştirmektir. Tritikale, stres koşulları altında buğdaya

göre daha iyi gelişim performansına sahiptir. Tritikalenin dane kalitesi, buğday gibi diğer küçük daneli ürünlerle karşılaştırıldığında tatmin edici olmasa da, birçok hastalık ve zararlıya karşı hala iyi düzeyde bir direnç sahiptir ve pek çok faydalı gen, Tritikaleden buğdaya başarılı bir şekilde aktarılmıştır (Mergoum vd., 2019; Wójcik-Gront ve Studnicki, 2021). Buğdaya göre kuraklık, alüminyum, don, su basması toleransı göstermektedir. Aynı zamanda, verim açısından üstündür, çeşitli toprak ve çevre koşullarına daha iyi uyum sağlar ve buğdaya elverişsiz olan marjinal alanlarda buğdaya göre çok daha yüksek tahıl verimi elde edilmektedir (Bielski vd., 2020). Tüm bu özellikleri tritikaleyi Polonya, Almanya, İspanya ve Fransa gibi birçok Avrupa ülkesinde yetiştirilen değerli ve köklü bir ürün haline getirmektedir. Tritikalenin danesi esas olarak hayvan yemi olarak kullanılmakla birlikte, biyoetanol ve biyoyakıt üretiminin yanı sıra insan gıdası olarak da kullanılmaktadır (Golebiowska-Paluch ve Dyda, 2023). Bu ürün aynı zamanda moleküler ıslah teknikleri kullanılarak çavdar ve buğday genetik havuzu arasında uygun genlerin aktarılması için değerli bir genetik köprüdür (Golebiowska-Paluch ve Dyda, 2023).

Tritikale, buğdaya benzer bir protein içeriğine, daha yüksek oranda çözünür liflere ve antioksidan aktiviteye sahip çok sayıda fenolik bileşiği taşımaktadır. Özellikle yüksek lizin içeriği, proteinlerin biyolojik değerini artırarak buğdaya kıyasla daha dengeli bir amino asit bileşimi sağlamaktadır. Nişasta bileşimi, nişasta olmayan polisakkaritler (NSP), polifenoller ve vitaminler de Tritikale unlarının üstün besin değerine katkıda bulunmaktadır. Tritikale gluten içermesine rağmen, iyi esansiyel amino asit dengesi, mineraller ve vitaminler ile sağlığa olan yararları nedeniyle yükselen sağlıklı gıda pazarında rol oynamaktadır (Mergoum vd., 2019; Wójcik-Gront ve Studnicki, 2021). Bu nedenle, besin maddelerini Tritikaleden tüketmenin sağlık açısından yararları, tüketicilerin tritikaleye yönelik kabulünü artırmak ve daha adaptif yeni çeşitlerin ve işleme yöntemlerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir (Camerlengo ve Kiszonas, 2023).

2.5 Kaynak Özetleri

Kuraklık, bitki morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler özelliklerini ciddi şekilde etkileyerek bitki biyokütlesi üretimi, kalitesi ve enerjisini engellemektedir. Kuraklıkla başa çıkmak için bitkiler, türden türe farklılık gösteren fizyolojik ve biyokimyasal tepkiler de dahil olmak üzere çeşitli karmaşık direnç ve adaptasyon mekanizmaları geliştirmektedirler (Seleiman vd., 2021). Genel olarak kuraklık stresinin bitkilerde morfo-fizyolojik, biyokimyasal ve metabolomik özelliklerin kapsamlı analizi,

bitki metabolik yanıtlarına ve biyokimyasal düzeyde stres koşullarının zararlı etkilerini azaltmak için uygulanan stratejilere genel bir bakış sağlamaktadır. Tahıllarda, kuraklık stresinin olumsuz etkilerine yönelik literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Kasim vd. (2013), kuraklık stresinin olumsuz etkilerinin buğday fidelerinde morfolojik parametreler üzerine etkilerini ortaya koyduğu çalışmada, taze ağırlık, kuru ağırlık ve su içeriğinde azalma gözlenirken, kuraklık stresi ile ilişkili olan *APX1*, *SAMS1* ve *HSP17.8* genlerinin ifade seviyelerinde artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Wehner vd. (2015), 156 kışlık arpa (*Hordeum vulgare* L.) çeşidini kuraklık stresine maruz bıraktıkları çalışmalarında, kuraklık stresi sulanması, toprak maksimum toprak su kapasitesinin %20'sine ulaşana kadar durdurulup ve daha sonra bu seviye, her saksı tartılarak ve yeniden sulanarak korunmuştur. Kontrol bitkilerinde ise maksimum toprak su kapasitesinin %70'ine kadar sürekli olarak sulanmıştır. Uyguladıkları kuraklık stresi sonucunda, serbest prolin içeriği kontrol gurubuna kıyasla 6,5 kat artış göstererek, kuraklık stresi sonucunda serbest prolin içeriğinin arttığını ortaya koymuşlardır.

Gregorová vd. (2015), yapmış oldukları çalışmada buğdayın 20 günlük kuraklık stresi uygulamasının ardından fizyolojik tepkiler, metabolik profil ve patojenezle ilişkili proteinlerini incelenmiştir. Seçili genlerin ifadesi enzimatik verilerle uyumlu ve kuraklık stresi altındaki buğdayda bu iki savunma bileşeninin dokuya özgü ve zıt bir davranışa sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Fenolik seviyesindeki metabolik analizler sonucunda ise, fenolik asitlerin serbest ve bağlı fraksiyonunda yalnızca sürgünlerde bir artış olduğunu ve flavonoid izoorientinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir.

Shanazari vd. (2018), tritikale, tritipyrum ve buğdayın kuraklık stresine karşı agronomik ve biyokimyasal tepkilerini değerlendirmek için yapmış oldukları çalışmada, 27 genotipi iki yıl boyunca stressiz ve kuraklık stresi koşulları altında yetiştirmişlerdir. Malondialdehit (MDA) ve hidrojen peroksit (H₂O₂), yaprak prolin içeriği, çözünür karbonhidratlar ve glisin betain içeriği ve lipid peroksidasyonun kuraklık koşulları altında attığı, bununla birlikte, bağıl su içeriği ve membran stabilite indekslerinin her ikisi de başak başına tohum sayısı, tohum ağırlığı, tohum verimi ve biyolojik veriminin kuraklık uygulamasının bir sonucu olarak azaldığını, tohum verimindeki en az azalmanın ise tritikalede olduğunu tespit etmişlerdir.

Riasat vd., (2019), kuraklık stresi ve normal sulama koşulları altında 20 tritikale genotipinde, enzimatik antioksidanların toleranslı genotiplerin belirlenmesinde önemli bir kriter olduğunu ve süperoksit dismutazın dolaylı seleksiyon yoluyla daha yüksek toleranslı genotiplere ulaşmak için en önemli kriter olarak bulunmuştur. Ayrıca, hidrojen

peroksit ve malondialdehit içeriğinin yağmur verimi ile yüksek korelasyon göstermesini, su stresi koşullarında düşük seviyelerine sahip genotiplerin taranmasında potansiyel kriterler olarak değerlendirilebileceğini göstermişlerdir.

Saed-Moucheshi vd., (2019) tarafından yapılan çalışmada, üç ardışık büyüme mevsimi (2013-2016) boyunca kuraklık stresine maruz bırakılan 58 tritikale genotipinin tane verimi ve biyokimyasal özellikleri değerlendirilmiştir. Kuraklık stresinin, erken başaklanma aşamasından hasat dönemine kadar yaklaşık 40 gün boyunca sulama yapılmadan uygulandığı çalışmada, prolin, H₂O₂, MDH ve protein içerikleri ile antioksidan enzimlerin aktivitelerinin kuraklık stresine yanıt olarak önemli ölçüde artışı bildirilmiştir.

DZ19-2 ve DZ19-1 olmak üzere beş ekmeklik buğday genotipinin tohumları, çimlenme ve fide büyüme özelliklerini değerlendirmek için PEG- 6000 uygulanmak suretiyle kuraklık stresine maruz bırakılmıştır. Kök uzunluğu ve kuru ağırlık açısından, Wafia, Lucilla ve DZ19-1 genotipleri üstün bulunmuş, diğer genotiplere göre nispeten kuraklık stresine dayanıklı oldukları ortaya konulmuştur. Bunun yanı sıra, biyokimyasal açıdan, prolin içeriği artan kuraklık seviyeleriyle birlikte artmış ve kuraklık stresi nedeniyle, kuraklığa dayanıklı buğday genotiplerinde sürgün prolin içeriği artarken, hassas genotiplerde kontrol grubuna oranla prolin seviyesi azalmıştır (Iyem vd., 2021).

Xie vd. (2021), fide aşamasındaki 15 yerli ve yabancı yulaf çeşidine %20 PEG-6000 uygulanarak kuraklık stresi mekanizmasının analiz edildiği çalışmada, DY2 çeşidinin çözünür protein içeriğinin ve süperoksit dismutaz aktivitesinin kuraklık stresi altında önemli ölçüde arttığını, fotokimyasal verimliliğin ve bağıl su içeriğinin ise azaldığı gösterilmiştir. QH444 ve DY2 çeşitlerinin bağıl elektriksel iletkenliği (REC) ve kuraklık hasar indeksleri düşük seviyedeki genotipler iken Q1 ve DY2'nin peroksidaz içeriğinin önemli ölçüde arttığı, Q1, QH444 ve DY2'nin ise katalaz aktivitesinin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Buna göre, gri korelasyon analizi sonucunda Fv/Fm, klorofil, REC ve malondialdehitin yulafın kuraklık direncini değerlendirmek için temel endeksler olarak kullanılabileceğini de belirtmişlerdir.

Zhang vd., (2022) tarafından kuraklığa toleranslı (DT) ve kuraklığa hassas (DS) buğday genotiplerin kuraklık stresi altındaki büyüme ve verim tepkileri incelenmiş, DT genotiplerin şiddetli biyokütle kaybına rağmen verim kaybını minimumda tuttuğunu belirlenmiştir. DS genotipler, hücre metabolizmasını desteklemek için prolin gibi amino asitleri aşırı üretmiş, ancak bu durum toksisiteye yol açarak yüksek verim kaybına neden

olmuştur. DT genotipler ise fenolik ve yararlı amino asit üretimini artırarak hücre korumasını güçlendirmiş ve verim kaybını etkin bir şekilde azaltmıştır.

Salam vd. (2022), beş buğday genotipinin kuraklık stresine verdiği morfolojik ve fizyolojik seviyedeki yanıtları belirlemek amacıyla yapmış oldukları çalışmada, 18 gün boyunca üç farklı (0, %10 ve %20) PEG-6000 konsantrasyonunda kuraklık stresi uygulanan buğday fidelerinde çimlenme yüzdesi, çimlenme indeksi, tohum canlılık indeksi, ortalama çimlenme süresi, sürgün uzunluğu, kök uzunluğu ve klorofil içeriği ölçümlerinde belirgin bir azalma belirlemişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada %20 PEG-6000 ile kuraklık stresine tabi tutulan buğday fideleri üzerinde letal etkiler de ortaya koymuşlardır.

Kuraklık stresinden etkilenen 4 çeşit tritikale çeşidinin morfolojik ve fizyolojik tepkilerini incelemek için yapılan çalışmada, çoklu karşılaştırma analizleri sonucu, kuraklık stres günleri ile tritikale genotipleri arasındaki etkileşimin dört genotip arasında, ortalama bağıl bitki boyunun 'Gannong No.2'de en yüksek, 'Gannong No.1'de ise ortalama bağıl kardeş sayısının en yüksek olduğu, ortalama bağıl biyokütle verimi, bağıl yaprak suyu içeriği ve peroksidaz aktivitesinin ise genotip C31'de en yüksek seviyede olduğu ve 'Shida No.1'de ise ortalama bağıl katalaz aktivitesinin yüksek seviyede ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Kapsamlı bir değerlendirme sonucunda, C31 genotipinin kalıcı kuraklık koşulları altında kuraklığa en dayanıklı genotip olduğunu ortaya çıkarılmıştır (Yang vd., 2023).

Mohammadi Alagoz vd., (2023), tritikalenin kuraklık ve tuz streslerine karşı morfo-fizyolojik tepkileri ve büyüme endeksleri üzerine yapmış oldukları çalışma sonucunda Giannillo-92 çeşidinin tuzluluk ve su eksikliği stresi altında prolin, çözünür şekerler ve karotenoidlerin üretimi ve birikimi artarken, klorofil içeriği, büyüme endeksleri, bağıl su içeriği ve tritikale verimi ise azalmıştır. Tuzluluk ve kuraklık stresinin birleşik etkileri, her stres ayrı ayrı uygulandığında olduğundan daha yüksek bulunmuştur. Bitkinin strese verdiği tepkilerin her fenolojik aşamada farklı olduğu, çiçeklenme aşamasında tuzluluk ve kuraklık stresinin birleşimine en duyarlı aşama olduğu, tritikalenin tuzluluk ve kuraklık stresinin yıkıcı etkilerine ve bunların neden olduğu oksidatif hasara karşı koymak için enzimatik olmayan savunma mekanizmasının (prolin, çözünür şekerler ve karotenoid içeriği) aktivitesinin artırıldığı ortaya konulmuştur.

Basiri vd., (2024), farklı tritikale genotiplerinde su eksikliği koşullarına yanıt olarak süperoksit dismutazın (SOD) ekspresyon seviyesinde meydana gelen değişiklikleri inceledikleri çalışmada, yeni üretilen dokuz tritikale genotipi üzerinde iki farklı yılda

farklı sulama rejimleri altında, bitki boyu ve hasat indeksi hariç, ölçülen tüm parametrelerin sulamadan etkilendiğini ve genotipler arasında önemli farklılıklar olduğunu belirlemişlerdir. Kullanılan tüm tritikale genotipleri için normal sulama koşulları altında ve çiçeklenme aşamasında sulama yapılmadan H₂O₂ ve MDH içeriği su stresi uygulamasında normal koşullara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek bulunurken, tüm antioksidanların aktiviteleri normal sulamadan su eksikliği koşullarına doğru artmıştır. Buna göre, kuraklık stresi ve genotipin SOD gen ifadesi üzerindeki ana etkisinin sürgün ve kök dokularında anlamlı olduğu bulunmuştur.

Bitkiler ve bitki ıslahı açısından bakıldığında, metabolomik bitki performansını değerlendirmek, biyotik/abiyotik stres toleransına bağlı hayati metabolik belirteçleri araştırmak, mutant karakterizasyonunu gerçekleştirmek ve güçlü eko tipleri tespit etmek için ideal bir tanı aracı olarak belirtilmektedir (Razzaq vd., (2022)).

Ma vd., (2016), kuraklığa düşük toleranslı (IRAT109) ve yüksek toleranslı (IAC1246) iki pirinç çeşidinde fotosenteze katkıda bulunan temel metabolik yolları incelemiştir. Çalışma, IAC1246'nın yaprak bağıl su içeriği (RWC) ve fotosentez oranlarının kuraklık stresinin erken dönemlerinde daha iyi korunduğunu, IRAT109'un ise bu dönemlerde fotosentez oranlarında ciddi azalma gösterdiğini ortaya koymuştur. Kuraklık stresine verilen metabolik tepkilerde IRAT109 ve IAC1246 arasında farklılıklar tespit edilmiş, özellikle putresin, malonik asit, glikoz-6-fosfat gibi birçok metabolitin kuraklık koşullarında yukarı düzenlendiği bulunmuştur. Bu bulgular, 4-hidroksisinnamik asit ve ferulik asit metabolizmaları gibi yolların düzenlenmesinin kuraklık toleransını artırmak için potansiyel hedefler sunduğunu göstermiştir.

Jia vd., (2016), Çin geveninin ilerleyen kuraklık stresine verdiği yanıtları transkriptomik ve metabolomik analizlerle karakterize ettikleri çalışmada, H-NMR spektrometrisi ile metabolik profillemeye yapmışlar ve prolin ve trigonellin gibi metabolitlerin stres sırasında belirgin şekilde arttığı, özellikle prolinin şiddetli stres koşullarında kontrol seviyelerine göre 60 kat daha yüksek olduğu bulunmuştur. Transkriptomik analizler, kuraklık stresinin gen ekspresyon profillerini önemli ölçüde etkilediğini, şiddetli stresin daha fazla aşağı regüle edilen gen ile sonuçlandığını ve metabolit seviyelerinin stres dozu ve süresine bağlı olarak dinamik değişimler gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Rahman vd., (2017), post-anthesis döneminde buğdayın (*Triticum aestivum* L.) kuraklık stresine verdiği yanıtları LC-HRMS tabanlı hedefsiz metabolomik analiz ile incelemiştir. Yumuşak kışlık buğday çeşidi 'SS8641' üzerinde yürütülen çalışmada,

metabolit profilleri sekiz farklı zaman noktasında kuraklık ve kontrol koşulları altında analiz edilmiştir. Veriler, MetaboAnalyst 3.0 platformunda normalleştirilerek incelenmiş ve kuraklık stresine maruz kalan bitkilerde 152 metabolitin kontrolle kıyasla anlamlı şekilde farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Kuraklık stresi, buğdayın fizyolojik özelliklerini de etkilemiş, yaprak klorofil içeriği %11 oranında azalmış ve elektrolit sızıntısı %18 oranında artarak plazma zarlarında hasara neden olmuştur. Ayrıca, toplam biyokütle, başak başına tane ağırlığı, 1000 tane ağırlığı ve hasat indeksi gibi agronomik parametrelerde kuraklık koşulları altında önemli azalmalar tespit edilmiştir.

Ullah vd., (2017), 7 tritikale çeşidinin kök ve yapraklarında kuraklık stresine verilen metabolik tepkiler UPLC-MS/MS platformuyla analiz edilmiştir. Kuraklığa toleranslı (DT) Jinmai 47 ve 908216 genotiplerinde 38 up, 19 down düzenlenmiş metabolit tespit edilirken, kuraklığa hassas (DS) Lankaoaizao 8 ve Zhengmai 9023 genotiplerinde 82 up ve 39 down düzenlenmiş metabolit belirlenmiştir. DS genotiplerinde prolin seviyeleri artış gösterirken, DT genotiplerinde bu artış daha düşük seviyelerde kalmıştır. DS genotiplerinde L-threo-3-metilaspartat ve glutamik asit gibi bazı metabolitlerin belirgin şekilde up düzenlendiği, ancak DT genotiplerinde bu değişimlerin gözlenmediği tespit edilmiştir. DT genotiplerinde fenilalanin yukarı düzenlenirken, DS genotiplerinde bu amino asit değişmeden kalmıştır. Yedi genotipin kök morfolojisinde ise kuraklık stresine karşı kök uzunluğu ve yüzey alanında artış gözlenmiş, ancak yan kök oluşumu azalmış ve kök çaplarında küçülme kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında, şekerler, amino asitler ve organik asitler dahil 45 metabolitin kuraklık stresinde önemli rollere sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle 21 metabolitin TR39477, IG132864 ve Bolal genotiplerinin hem yaprak hem de kök örneklerinde artışı rapor edilmiştir.

Michaletti vd., (2018), kuraklık stresi altında kuraklığa duyarlı (*Bahar*) ve dayanıklı (*Kavir*) iki baharlık buğday çeşidinin proteomik ve metabolomik analizlerini gerçekleştirmiştir. Kuraklık, *Bahar* çeşidinde fotosentetik proteinlerin, şeker ve azot metabolizmasında yer alan enzimlerin seviyelerini düşürmüş ve detoksifikasyon kapasitesini azaltmıştır. *Kavir* çeşidinde ise protein seviyeleri ve metabolom daha az etkilenmiş, sadece pürin metabolizması gibi birkaç yol değişiklik göstermiştir. Amino asitler, organik asitler ve şekerler dahil olmak üzere önemli metabolitler, özellikle *Bahar* çeşidinde prolin, triptofan ve poliamin sentezinde artışla sonuçlanmıştır.

Kang vd., (2019) ise GC/MS tabanlı metabolomik çalışmada LA754 (kuraklığa dirençli) and AGS2038 (kuraklığa hassas) buğday genotiplerinin bayrak yapraklarında 142 ve köklerinde 99 metabolit saptamıştır. Kuraklık stresi uygulamasından sonra,

kuraklığa dayanıklı çeşidin köklerine oranla yapraklarında çok daha büyük metabolit varyasyonları ortaya çıkarken, malik asit, fumarik asit, sitrik asit, valin ve triptofan konsantrasyonlarının köklerde down regule edilirken yapraklarda arttığı görülmüştür. Sonuçlar, toleranslı çeşitte pikolinik asit, piridoksal, alfa-fokaekolik asit, vanilin ve homovanilik asit dahil olmak üzere birkaç fenol içeren bileşiğin iki kat daha yüksek üretimini göstermiştir.

Wang vd. (2019), iki yabancı soya çeşidinin kök ve sürgün yükseklikleri PEG ile stimüle edilmiş kuraklık stresi altında önemli ölçüde azalmıştır. Miyo-inozitol, mannitol, sorbitol ve füköz, hücre zarlarının ve proteinlerin en etkili ozmotik koruyucu ajanlarıdır ve kuraklık stresi sırasında hücre stabilitesini artırabilirler. Kuraklığa dayanıklı yabancı soya fasulyesi, sıradan yabancı soya fasulyesiyle karşılaştırıldığında daha iyi büyümüştür. Metabolit profili analizi, trikarboksilik asit döngüsünün kuraklığa dayanıklı yabancı soya fasulyesinde arttığını, ancak simüle edilmiş kuraklık stresi altında sıradan yabancı soya fasulyesinde kontrol grubuna kıyasla inhibe edildiğini göstermiştir. Deneysel sonuçları, kuraklığa dayanıklı yabancı soya fasulyesinin sıradan yabancı soya fasulyesine göre kuraklık stresine uyum sağlama yeteneğinin daha yüksek olduğunu doğrulamıştır.

You vd., (2019), kuraklığa dayanıklı ve hassas susam genotiplerinin kuraklık stresine tepkilerini transkriptomik ve metabolomik analizlerle incelemiştir. UPLC/MS ve GC/MS kullanılarak yapılan analizlerde, dayanıklı genotipinde D-sakkarik asit, 4-hidroksiprolin, putresin ve bazı amino asitlerin kuraklık stresi altında yüksek birikim gösterdiği, hassas genotipinde ise arbutin ve tetronik asit gibi metabolitlerin daha fazla biriktiği tespit edilmiştir. Dayanıklı genotipinde histidin, arginin, prolin ve treonin gibi amino asitler yalnızca kuraklık stresi altında artarken, her iki genotipte triptofan, fenilalanin ve izolösin gibi amino asitler önemli ölçüde birikmiştir.

Guo vd., (2020), kuraklık stresi altında yetiştirilen buğday genotiplerinden *HX10*'un, *YN211*'e göre daha yüksek büyüme indekslerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Kuraklık stresi sonrası HX10 genotipinde fenolik bileşikler, timin, amino asitler, alkaloidler, organik asitler ve flavonoidlerin yüksek seviyelerde birikiminin, HX10'un güçlü kuraklık tolerans kapasitesini desteklediği belirtilmiştir. Gundaraniya vd., (2020), kuraklığa dayanıklı (TAG 24) ve hassas (JL 24) yer fıstığı genotiplerinin kuraklık stresine yanıtlarını GC-MS ile metabolomik analiz kullanarak incelemiştir. TAG 24 genotipinde yaprak ve köklerde mannoz, miyo-inositol, stearik asit ve pentadekanoik asit gibi metabolitlerin birikimi gözlemlenmiş, bu metabolitlerin ozmoprotektan olarak kuraklık toleransını desteklediği belirtilmiştir. JL 24 genotipinde ise şekerler, organik

asitler ve yağ asitleri gibi metabolitlerin birikimi tespit edilmiştir. Çalışma, stres koşulları altında TAG 24'te biriken kardinal metabolitlerin, kuraklık stresine özgü belirteçler ve potansiyel biyokimyasal yollarla ilişkilendirilebileceği sonucuna varmıştır.

Zhang vd., (2022), kuraklığa dayanıklı (DT) Jinmai 47 ve 908216 ile kuraklığa hassas (DS) Lankaoaizao 8 ve Zhengmai 9023 buğday genotiplerinin metabolik tepkilerini UPLC-MS/MS platformuyla analiz ettikleri çalışmalarında, DT genotiplerinde 38 yukarı düzenlenmiş ve 19 aşağı düzenlenmiş metabolit, DS genotiplerinde ise 82 yukarı düzenlenmiş ve 39 aşağı düzenlenmiş metabolit tespit edilmiştir. DS genotiplerinde prolin, L-threo-3-metilaspartat ve glutamik asit gibi metabolitlerin birikimi daha belirgin olmuştur. DT genotiplerinde altı fenolik asit ve hücrel osmotik dengeyi destekleyen metabolitler önemli ölçüde artmıştır. DS genotiplerinde ise lipid metabolitlerinin ve lizofosfolipidlerin aşağı düzenlendiği bulunmuştur. Çalışma, DS genotiplerinin kuraklık stresi altında daha az biyokütle kaybı ve yüksek prolin birikimi ile tepki verdiğini, DT genotiplerinin ise metabolik adaptasyonlarını daha farklı yollarla gerçekleştirdiğini göstermiştir.

Cheng vd., (2022), PEG-6000 ile oluşturulan kuraklık stresi altında kuraklığa dayanıklı (*Chuansi No.1*, DT) ve kuraklığa duyarlı (*Double Barrel*, DS) iki çavdar çeşidini fizyolojik ve transkriptomik düzeyde karşılaştırmıştır. Çalışma, DT genotipinin daha uzun kökler, gelişmiş adventif kök yapısı, daha yüksek su içeriği, osmotik ayarlama yeteneği ve kök SOD aktivitesi ile kuraklık koşullarında üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, sakkaroz ve nişasta sentaz aktivitelerinin artışı ile enerji sağlanmış, kök yapısını destekleyen *XTH* geni ve kök canlılığını koruyan transkripsiyon faktörlerinin DT genotipinde daha fazla yukarı regüle edildiği tespit edilmiştir.

Girija vd., (2023), Akdeniz yulafı (*Avena sativa L.*) çeşitlerinde kuraklık sırasında hızlandırılmış tane dolumuna yönelik metabolik değişiklikleri FIE-MS ile analiz etmişlerdir. Kuraklık, Flega çeşidinde metabolik değişimlerin daha belirgin olmasına rağmen Patones çeşidinde biyokütle ve salkım sayısında daha fazla azalma ile sonuçlanmıştır. TCA ve glikoliz ara maddeleri, şekerler, organik asitler ve gibberellin gibi metabolitler kuraklıkta artış gösterirken, GABA, glutatyon ve N-asetil-D-glukozamin fosfat gibi bileşikler azalmıştır. Kuraklık, Patones'te sakkaroz ve sitrik asit seviyelerini artırırken, Flega'da AICAR, gibberellin ve behenik asit gibi metabolitlerde duyarlı değişimlere yol açmıştır, yağ asidi türevlerinin birikimi ve C18 metabolizması azalmış; özellikle linoleik asit ve palmitik asit gibi yağ asitleri daha yaşlı tahıllarda belirgin şekilde düşmüştür.

Nešporová vd., (2024), su tasarrufu ve su harcama stratejilerinin buğdayın (*Triticum aestivum*) kuraklığa tepkisi ve toparlanma süreci üzerindeki etkilerini fizyolojik, proteomik ve metabolomik açıdan incelemişlerdir. Baletka ve Tobak genotipleri üzerinde yapılan çalışmada, MALDI-TOF-MS kullanılarak 46 metabolit tanımlanmış, bunların %48'ini sakkaritler, şeker alkoller ve organik asitler oluşturmuştur. Su tasarrufu sağlayan genotiplerde metabolik yollarda hücre sinyalizasyonu, endositoz, hücre duvarı yeniden şekillenmesi, oksalat metabolizması, ROS temizleme mekanizmaları ve enerji metabolizmasında değişiklikler gözlenmiştir. Ayrıca, LEA 1 ve LEA 3 proteinleri, DHODH, steroid bağlayıcı protein ve LTI 65 kDa gibi savunma proteinlerinin sentezi artış göstermiştir.

Ren vd., (2024), Hequ kırmızı darısı (H) ve kuraklığa duyarlı Yanshu No. 10 (Y) çeşitlerini kullanarak süpürge darısında kuraklığa tepki özelliklerini metabolomik ve fizyolojik yöntemlerle incelemişlerdir. Kuraklık stresi, Hequ kırmızı darısında amilopektin (%2,57), piridoksin (%31,89) ve antosiyanin içeriğini artırırken, suda çözünür protein (%5,82), glutelin (%10,07), tiamin (%14,95) ve nikotinamid (%23,01) içeriğini azaltmıştır (Ren vd., 2024).

Fu vd., (2024), kışlık buğday çeşidi Jimai 418'in dört gelişim aşamasında (GS31, GS45, GS65 ve DAA8) transkriptomik ve metabolomik analizler gerçekleştirmiştir. Toplamda sırasıyla 29, 42, 49 ve 13 eş-zenginleştirilmiş yol belirlenmiş ve tüm aşamalarda galaktoz metabolizması, pentoz ve glukuronat dönüşümleri ile beta-alanin metabolizması ortak yollar olarak tespit edilmiştir. GS45 ve GS65'te toplam 35 eş-zenginleştirilmiş yol, membran taşımacılığı, karbonhidrat ve lipid metabolizması gibi süreçleri içerirken, bu yolların buğdayın kuraklık toleransına katkıda bulunduğu belirtilmiştir.

Yapılan kapsamlı literatür taramaları sonucunda tritikale çeşitlerinin kuraklık stresine direnç mekanizmalarının fizyolojik, biyokimyasal ve high throughput metabolom profillemesine dair herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında kuraklık stres dirençleri belirlenen 13 farklı tritikale çeşidinin, fizyolojik özellikleri, antioksidan enzim mekanizması ve metabolit aktivitesi karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek çeşitler arasındaki farklılıklar ortaya konulmuştur.

3 MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, ülkemizde tescilli ve üretim izni olan tritikale çeşitlerinin, kuraklık stresi altında morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve yüksek verimli metabolomik profillemeye yöntemleriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır.

3.1 Deneylerde Kullanılan Tohumlar

Tez çalışmasında kullanılan tritikale çeşitleri Alperbey, Melez-2001, Mikham-2002, Tatlıcak-97 tohumları Bahri Dağdaş Uluslararası Tarımsal Araştırma Enstitüsünden, Egeyıldızı tohumları Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsünden, Karma-2000 ve Presto tohumları Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsünden, Tacettinbey tohumları Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesinden, Ümranhanım tohumları Doğu Anadolu Tarımsal Araştırma Enstitüsünden, Melihbey tohumları Olgunlar Tarım Limited Şirketinden, Bera tohumları Yonca Tarım Ürünlerinden, Kinerit tohumları OSM Tohum, Bc Goran tohumları BC Enstitüsü Limited Şirketinden, Trica, Tricanto, Brehat tohumları ise İtalya'dan temin edilmiştir. Tohumlar, yüzey sterilizasyonuna maruz bırakılmak amacıyla %1'lik sodyum hipoklorit çözeltisinde 5 dakika bekletildikten sonra saf suyla yıkanmış (Baltepe ve Mert, 1973) ve tohumların kurumasını ardından sonra petri kaplarına ekimi yapılmıştır.



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan *Triticosecale wittmack* tohumları



Şekil 3.2. Deneyde kullanılan *Triticosecale wittmack* tohumlarının yüzey sterilizasyonu

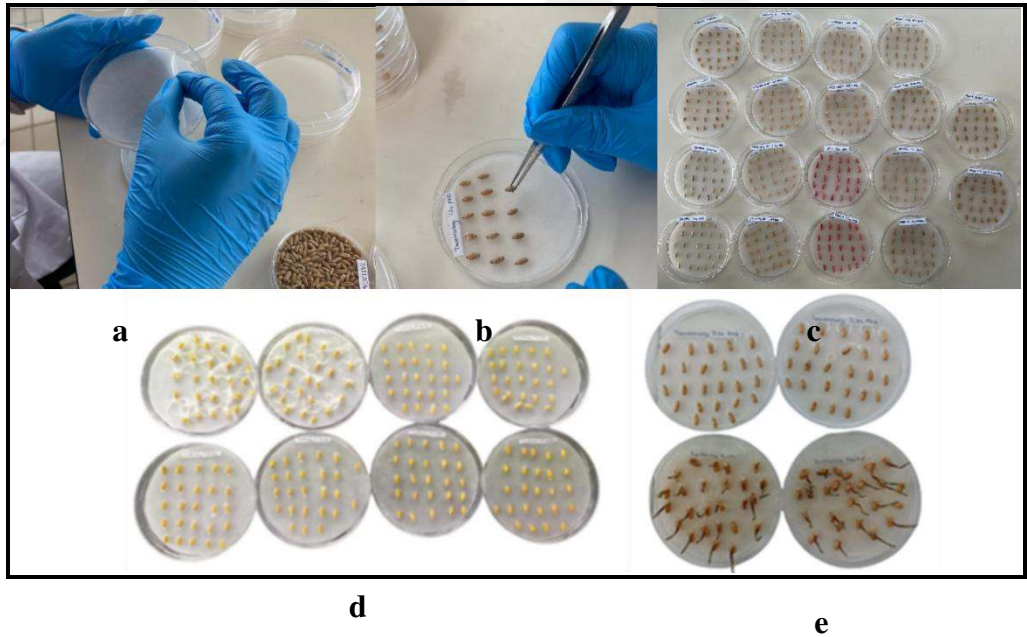
3.1.1 Deneyde Kullanılan Tohumların Kuraklık Stres Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Tritikale tohumlarının çimlendirme deneyleri 7 gün boyunca 16 saat 24°C’de 8 saat 18°C sıcaklık ve %50 neme ayarlı iklimlendirme odasında karanlık ortamda yapılmıştır. Tritikale tohumları 9cm’lik petri kaplarına 7 ml saf su ve ilgili PEG-6000 konsantrasyonunun belirlenmesi için %5, 10, 15, 20, 22, 24, 25, 26, 28 30 aralığında ekimi yapılan tritikale tohumlarının. 7. günün sonunda çimlenme ve kotileoptil yüzdesi (%) ölçümleri alınarak kuraklık stresi olarak uygulanacak olan konsantrasyon belirlenmiştir.

7. günün sonunda elde edilen bulgulara dayanarak PEG-6000 konsantrasyonu tritikale çeşitlerinde ED değeri bakımından %50 çimlenme oranını geçen çeşitler seçilmiş ve %24 olarak belirlenmiştir. Buğday ve çavdar olan ebeveynlerine kıyasla kuraklık stresine dirençli olan Presto, Trica, Mikham-2002, Karma-2000 ve Alperbey ile ebeveynlerine göre hassas olarak belirlenen Tacettinbey ve Tatlıcak-97 olmak üzere toplam 7 tritikale çeşidi ile ebeveynleri olan buğday ve çavdar dahil toplamda 9 farklı genotip ile çalışmalara devam edilmiştir. Buna göre, her genotip için 10 birey (5 birey kontrol, 5 birey %24 PEG-6000) saksılara ekilerek yetiştirilmiş ve ileri aşamalarda gerçekleştirilecek olan morfo-fizyolojik, biyokimyasal ve metabolomik analizlerin kuraklık stresi altında bitki büyüme ve gelişmesine etkilerinin değerlendirilmesi için saksılara transfer edilerek toplamda 21 gün boyunca yetiştirilmiştir.



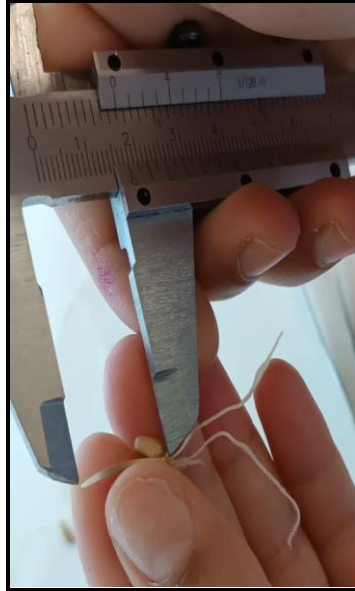
Şekil 3.3. Deneyde kullanılan *Triticosecale wittmack* çeşitlerinde %50 çimlenme oranını geçen tohumlar



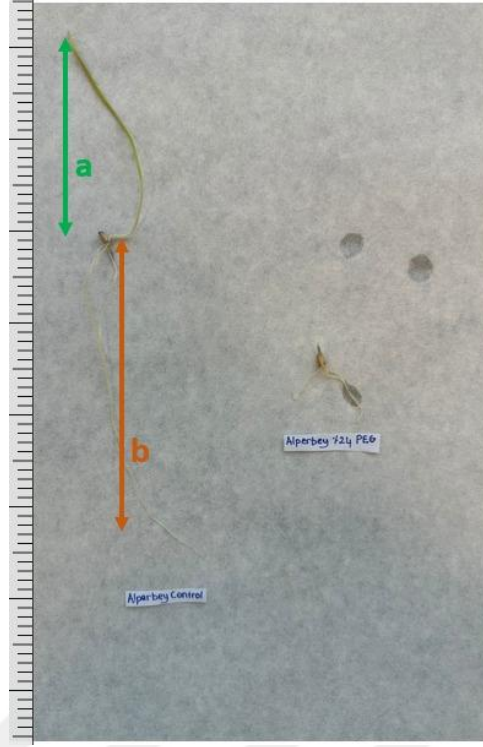
Şekil 3.4. Deneyde Kullanılan *Triticosecale wittmack* Tohumlarının Kuraklık Stresi (PEG-6000) Konsantrasyonlarının Belirlenmesi **a)** Petrilerin konsantrasyonlarının hazırlanması **b)** Tohumların petri kutularına ekimi, **c)** tohumların petrilerde büyütülüp çeşitlerin belirlenmesi **d)** PEG-6000 konsantrasyonlarının belirlenmesi, **e)** Kuraklık stresine maruz bırakılan tohumların 7 gün boyunca petri kaplarında çimlendirilmesi

3.2 Morfofizyolojik Analizler

Yüzey sterilizasyonuna tabii tutulan 100 adet, dolgun görünüşlü, sağlam ve birbirine benzer büyüklükte olan tritikale tohumları iki kat kurutma kağıdı kaplı 7 ml saf su ve PEG 6000 konsantrasyonlarının olduğu petrilere ekilerek 24°C sabit sıcaklıkta 16 saat aydınlık ve 8 saat karanlık, %45-50 nem periyoduna ayarlı iklimlendirme odasında büyütülmüştür 7. Günün ardından ise morfo-fizyolojik özelliklerin belirlenmesi için Çimlenme yüzdesi, petri kaplarında çimlenen tohumların sayılarak toplam tohum sayısına oranlanıp yüzdelik bakımından hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Koleoptil yüzdesi ise yine aynı şekilde petri kaplarında koleoptil miktarının sayılarak toplam tohum sayısına oranlanıp yüzdelik bakımından hesaplanmasıyla elde edilmiştir (ISTA, 1996). Radikula ve koleoptil uzunlukları ise; kökün başlangıç kısmından başlayarak en uzun saçak kökün ucuna kadar milimetrik cetvel ile radikula uzunlukları tespit edilmiştir. Koleoptilin ayırım yerinden başlayarak koleoptilin ucuna kadar milimetrik cetvel ile koleoptil uzunlukları ölçümü yapılmıştır. Radikula sayısı her bir tohumdaki toplam radikulaların sayılmasıyla ölçülmüştür. Taze ağırlık her bir konsantrasyona ait tohumların Precisa marka hassas terazi ($d = 0,0001$) yardımıyla ölçülmesi ile hesaplanmıştır (Böhm, 1979).



Şekil 3.5. Deneyde kullanılan tritikale çeşitlere ait fidelerin 7 günlük morfofizyolojik ölçümlerinin alınması



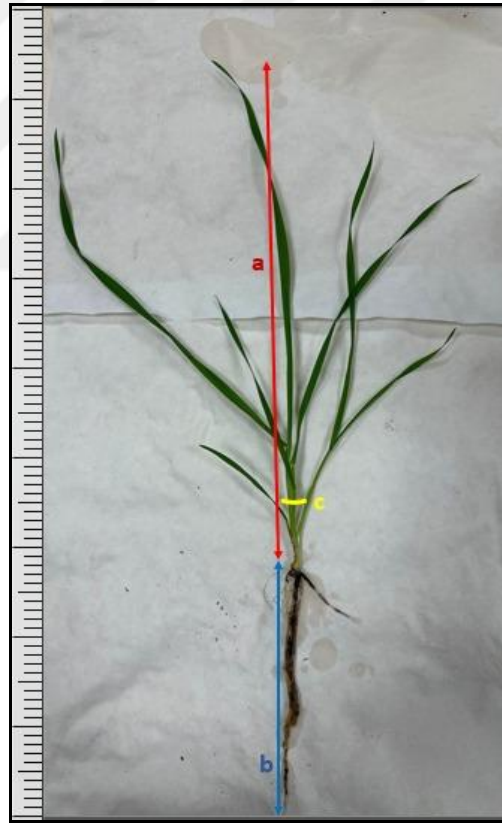
Şekil 3.6. Deneyde kullanılan Tritikale çeşitlere ait fidelerin **a)** koleoptil uzunluğu **b)** radikula uzunluğu ölçümleri

İklimlendirme odasında 7 gün sonunda petri kutularında çimlendikten sonra fide gelişimi desteklenen tohumlar birer litrelik saksılara içerisinde NPK 14-10-18 m³'de torf-toprak-vermikülit karışımı bulunan ortama transfer edilmiştir. Her saksıda bir fide olacak şekilde yapılan ekimler sonunda bitkiler, 24°C sabit sıcaklıkta 16 saat aydınlık ve 8 saat karanlık, %45-50 nem periyoduna ayarlı iklimlendirme odasında büyütülmüştür. 14 gün boyunca normal koşullarda saksılarda gelişen bitkilere 7 gün kuraklık stresi uygulanması amacıyla kontrol grubu saksıları her üç günde bir 20 ml saf su ve kuraklık stresi grubu ise her üç günde bir 20 ml PEG-6000 ile sulandı. 7. Günün sonunda fizyolojik ölçümler alındı. 21 gün fizyolojik ölçüm parametreleri ise; Bitki uzunluğu, gövdedeki en genç tam yaprağın başladığı noktadan başlayarak apikal meristemin uç kısmına kadar milimetrik cetvel yardımı ile ölçülmesiyle hesaplanmıştır, kök sayısı primer ve sekonder köklerin toplanmasıyla hesaplanmıştır, kök uzunluğu ise gövdenin başladığı noktadan başlayarak en uzun kökün sonuna kadar olan kısmın milimetrik cetvel yardımı ile ölçülmesiyle hesaplanmıştır, gövde çapı, gövdenin en kalın kısmının kumpas yardımı ile ölçülmesiyle milimetrik olarak hesaplanmıştır. Yaprak alanı, bitkide bulunan en genç tam yaprağın en geniş boy ve en noktasının kumpas yardımıyla ölçülmesiyle milimetrik olarak hesaplanmıştır,

taze ağırlık her bir konsantrasyona ait tohumların Precisa marka hassas terazi ($d = 0,0001$) yardımıyla ölçülmesi ile hesaplanmıştır (Böhm, 1979).



Şekil 3.7. İklimlendirme odasında saksıya aktarılan tritikale fidelerine 7 gün boyunca %24 PEG-6000 ile kuraklık stresi uygulaması



Şekil 3.8. Deneyde kullanılan tritikale çeşitlerine ait fidelerin kuraklık stresi uygulaması sonrasında 21. Gün Morfo-fizyolojik ölçümlerin alınması **a)** gövde boyu **b)** kök uzunluğu **c)** gövde çapı **a+b)** bitki boyu

3.3 Biyokimyasal Analizlerinin Yapılması

3.3.1 Yaprakların Yetiştirilmesi ve Örneklerin Alınması

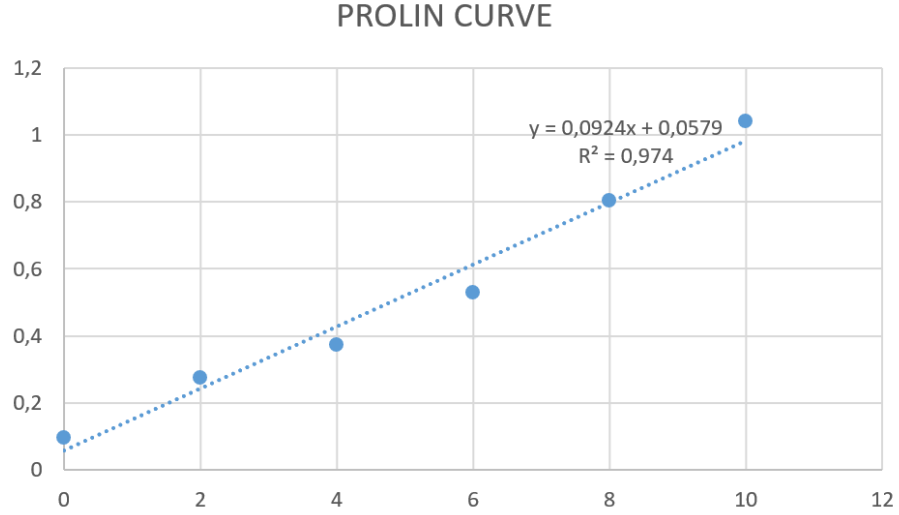
İklimlendirme odasında 14 gün boyunca yetiştirilen bitkiler 7 gün boyunca stres uygulamasına tabi tutulmuş ve kontrol grubu bitkileri üç günde bir 20 ml saf su ile sulanırken kuraklık stresine maruz bırakılan grup, üç günde bir 20 ml %24'lük PEG-6000 ile sulanmıştır. Her iki bitki grubuna ait örnekler 21. gün sonunda iklim kabininden alınmış ve biyokimyasal ve metabolomik en genç tam açılmış yaprak dokusunun ilgili miktarı Precisa marka hassas terazi ($d = 0,0001$) ile tartıldıktan 2 ml'lik tüplere alınmış, -86°C 'de analiz edileceği güne kadar depolanmıştır. Biyokimyasal parametrelerin değerlendirilmesi Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan BioTek Epoch Mikroplaka Spektrofotometre kullanılarak ölçümlenmiştir.

3.3.2 Prolin Miktarının Belirlenmesi

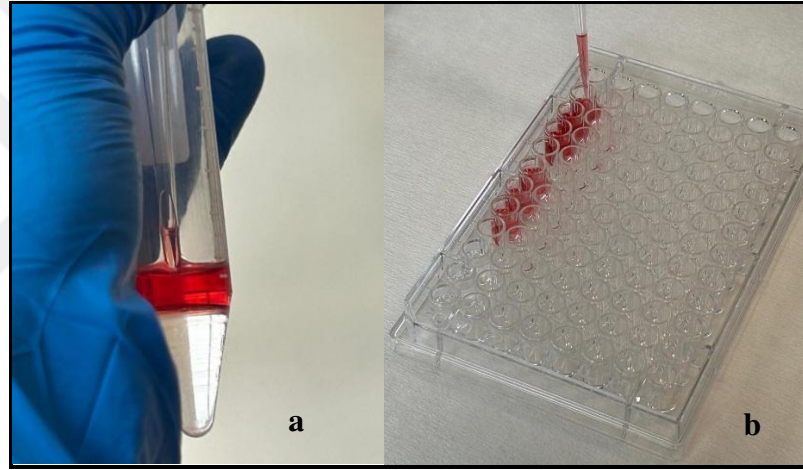
Prolin miktarının belirlenmesinde Bates vd., (1973)'nin metodu kullanılmıştır. Buna göre; 0.5 g yaprak dokusu % 3'lük sülfosalisilik asit ile homojenize edilmiştir. Filtre edilen homojenatın üzerine asit ninhidrin ve glasiyel asetik asit ilave edilip, 100°C 'de 1 saat süre ile su banyosunda bekletilmelerinin ardından buz içerisine konulmuştur. Elde edilen karışım tolüenle ekstrakte edildikten sonra sıvı fazdan aspire edilen tolüen fraksiyonunun absorbansı spektrofotometrede 520 nm dalga boyunda okutulmuştur.



Şekil 3.9. Deneyde kullanılan tritikale çeşitlerine ait fidelerin taze yaprak dokuları kullanılarak L-Prolin miktar tayini için kontrol eğrisi çözeltilerinin hazırlanması (0,2,4,6,8,10 ppm)



Şekil 3.10. L-Prolin miktar tayini için elde edilen kontrol (curve) eğrisi (mg/ml)

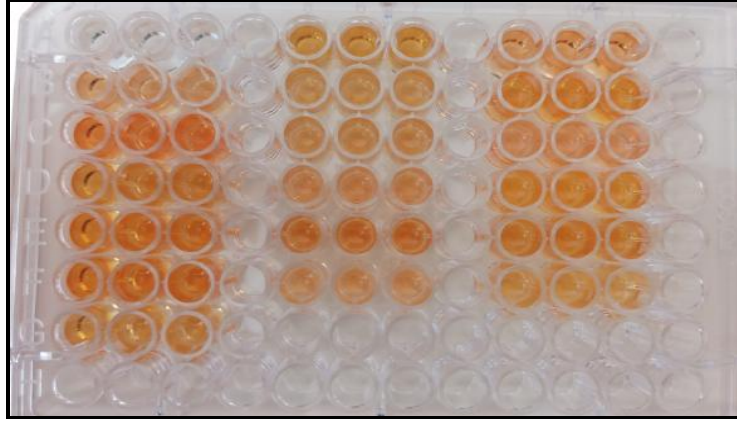


Şekil 3.11.L-Prolin miktar tayini için örneklerin **a)** toluen ile muamele edilip vortekslenmesi **b)** örneklerin 96 kuyucuklu mikroplakaya yüklenmesi (Corning® 96-well)

3.3.3 Malondialdehit Aktivitesinin Belirlenmesi

Lipid peroksidasyon seviyesi Malondialdehit (MDA) miktarının ölçülmesi ile ifade edilmektedir. MDA seviyesi Li (2000)'ye göre tanımlanmıştır. 0,2 gr taze yaprak, 1 mL %0,1'lik trikloroasetik asit (TCA) ile homojen hale getirilmiştir ve 1000 rpm'de 20 dakika santrifüj edilmiştir. Santrifüjden sonra 1 mL supernatant, TCA içinde 2,5 ml %0,5 TBA ile karıştırılıp ve 95°C' de 30 dakika sıcak su banyosunda inkübe edilmiştir. Reaksiyon buz üzerinde durdurulduktan sonra, 10 dakika boyunca 4000 rpm'de santrifüj edilmiştir. Örneklerin absorbans değerleri spektrofotometre kullanılarak 450, 532 ve 600 nm seviyelerinde incelenmiştir.

MDA hesaplaması ise; $C(\mu\text{mol L}^{-1}) = 6,45 (A_{532} - A_{600}) - 0,56 A_{450}$ formülü kullanılmıştır.



Şekil 3.12. MDA miktarının tayini için örneklerin 96 kuyucuklu plakaya yüklenmesi

3.3.4 Süperoksit Dismutaz Aktivitesinin Belirlenmesi

Antioksidan enzim seviyelerini belirlemek için, enzim ekstraktları ve hazırlama işlemi +4 derecede yapılmıştır. Taze yapraklardan 0,2 gr saf suda yıkandıktan sonra havan içerisinde 5 mL soğuk Sodyum Fosfat bufferi (50mM, ph 7,8) ile homojenize edilmiştir. Homojenatlar 10,500 rpmde 20 dk santrifüj edildikten sonra Süperoksit dismutaz (SOD) enzim seviyesi Fridovich (1971)'e göre hazırlanmıştır.

1,5 mL, 0,05 M Sodyum Fosfat Buffer (pH 7,8)
0,3 mL, 130 mM Metionin
0,3 mL, 750 μ M Nitrobluetetrazoliumchloride (NBT)
0,3 mL, 0,1 mM EDTA-Na₂
0,3 mL, 20 μ M Riboflavin
0,01 mL, Enzim Ekstraktı
0,01 mL, %4'lük Polyvinylpyrrolidone (PVPP)
0,28 mL saf su

Elde edilen 3 mL'lik karışım 2 adet 15W floresan lambasında 10 dk bekletildikten daha sonra 10 dk karanlıkta bekletilerek ve 560 nm'de ölçümü yapılmıştır.

3.3.5 Katalaz (CAT) Aktivitesinin Belirlenmesi

Katalaz enzim seviyelerini belirlemek için, enzim ekstraktları ve hazırlama işlemi +4 °C'de yapılmıştır. 200 mg'lık taze yaprak örnekleri saf suda yıkandıktan sonra havan içerisinde 5 mL soğuk Sodyum Fosfat bufferi (50mM, ph 7,8) ile homojenize edilmiştir.

Homojenatlar 10,500 rpm'de 20 dk santrifüj edildikten sonra katalaz enzim seviyesi Beers ve Sizer, (1952) metoduna göre belirlenmiştir.

1,5 mL, 200 mM Sodyum Fosfat Buffer (pH 7,8)

1 mL, saf su

0,3 mL, 0,1 M H₂O₂

0,2 mL, Enzim ekstraktından elde edilen karışımın 240 nm'de 4 dakikalık kinetik okuma sonucundaki değişim hesaplanarak tespit edilmiştir.

3.3.6 Askorbat Peroksidaz Aktivitesinin Belirlenmesi

Askorbat peroksidaz (APX) enzim seviyelerini belirlemek için, enzim ekstraktları ve hazırlama işlemi +4 derecede gerçekleştirilmiştir. Taze yapraklardan 0,2 gr saf suda yıkandıktan sonra havan içerisinde 5 mL soğuk Sodyum Fosfat bufferi (50mM, pH 7,8) ile homojenizasyon yapılmıştır. Homojenatlar 10.500 rpmde 20 dk santrifüj edildikten sonra Peroksidaz enzim seviyesi Kato ve Shimizu (1987) metoduna göre belirlenmiştir.

Tepkime karışımı hazırlamak için;

1 ml 50mM K-Fosfat Buffer (pH:7)

500 µl 1mM EDTA-Na₂

250 µl 0,5 mM Askorbik asit

200 µl 0,1 mM H₂O₂

50 µl ekstrakt alınarak hazırlanır ve 290 nm'de 4 dakika kinetik okuma sonucunda meydana gelen değişim hesaplanarak ölçüm yapılmıştır.

3.3.7 Total Protein Miktarı Analizi

Protein miktarının belirlenebilmesi için 21 gün sonunda elde edilen fidelerden (kontrol grubu ve kuraklık uygulaması) yaklaşık 300 mg yaprak örneği 2 mM Na-EDTA ve %1 PVP içeren 4 ml 50 mM potasyum fosfat Buffer çözeltisi (pH:7.0) ile homojenize edildikten sonra, 4 °C'de 10.000 rpm'de 10 dakika santrifüjlenmiş ve elde edilen süpernatantlar protein analizleri için kullanılmıştır (Özden vd., 2009). Yapraktan protein içeriği; Bradford (1976) yöntemine göre belirlenmiştir. Bu amaçla Bio-Rad ekstrasyon kiti kullanılarak;

- 1x DYE Regent'ı 4°C depolama alanından çıkartılmış ve ortam sıcaklığına kadar ılıması sağlanmıştır. Kullanmadan önce birkaç kez ters çevrilerek karıştırılmıştır.

- Her küvete 1x boya reaktifi eklenmiş ve vorteksleme yapılmıştır (1ml için: 20 µl örnek+ 1ml 1X Dye Reagent)
- 5 dakika oda sıcaklığında bekletilmiştir.
- 595 nm’de okumalar yapıldıktan sonra toplam protein miktarı mg/ml taze ağırlık olarak ifade edilmiştir.

Total protein miktarının belirlenebilmesi kontrol (curve) standart eğrisi oluşturabilmek için Bio-Rad Ekstraksiyon kitinde bulunan;

Kontrol 1ml 1X Dye Reagent

2 20 µl sample 2 + 1ml 1X Dye Reagent

1,5 20 µl sample 1,5 + 1ml 1X Dye Reagent

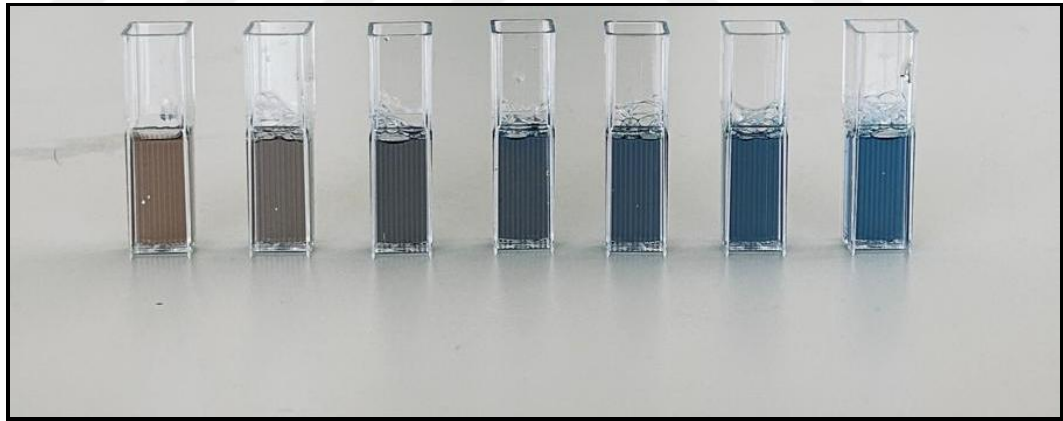
1 20 µl sample 1 + 1ml 1X Dye Reagent

0,75 20 µl sample 0,75 + 1ml 1X Dye Reagent

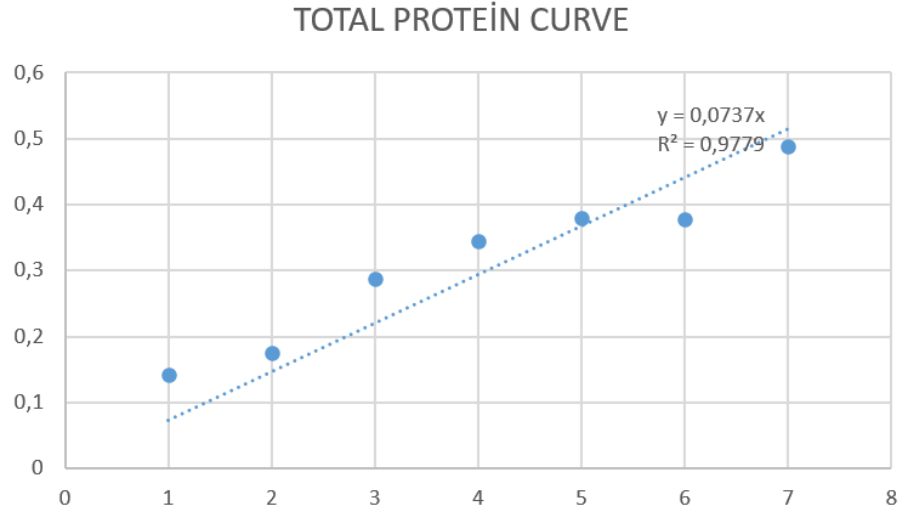
0,5 20 µl sample 0,50 + 1ml 1X Dye Reagent

0,25 20 µl sample 0,25 + 1ml 1X Dye Reagent

0,125 20 µl sample 0,125+ 1ml 1X Dye Reagent hazırlanarak spektrofotometrede 595 nm’de okuma yapılmıştır.



Şekil 3.13.Total protein miktarının tayini için elde edilen kontrol çözeltilerinin hazırlanması



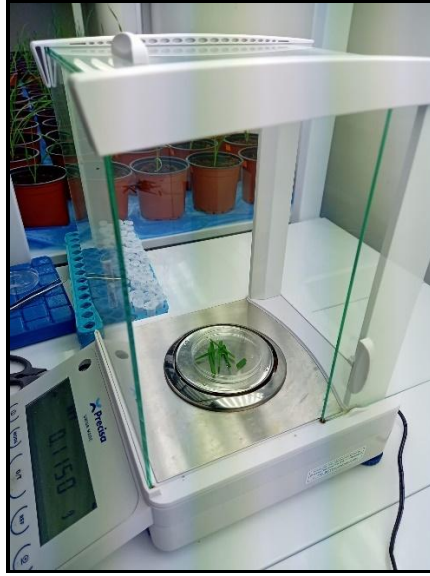
Şekil 3.14. Total protein miktarının tayini için elde edilen kontrol (curve) eğrisi (mg/ml)

3.4 High-throughput Metabolom Profilleme

Saksılarda yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulaması sonrasında 21 günlük periyodu tamamlayan her bir fideden 200 mg yaprak dokusu alınmış ve -86°C 'de muhafaza edilerek Avusturya Viyana Üniversitesi Metabolomik Merkezi'nde görevli Prof. Dr. Wolfram Weckwerth'e götürülüp okumaları ilgili merkezde yapılmıştır.



Şekil 3.15. Tritikale çeşitlerinin normal ve kuraklık stresi koşulları altında metabolom profillemeye için kullanılan taze yapraklarının 21 günlük gelişimleri



Şekil 3.16 Triticale çeşitlerinin normal ve kuraklık stresi koşulları altında metabolom profillemesi için her bir saksıdan yaprak dokusu alınması

Buna göre, Weckwerth vd., (2004) protokolü modifiye edilerek yaprak dokuları sıvı azotta (N_2) dondurularak kurutulmuş ve havan ve tokmak kullanılarak homojenize edilmiştir. Metabolitler, 500 μ L önceden soğutulmuş metanol: kloroform: su (2.5:2:1 v/v/v) karışımı ile ekstrakte edilmiştir. Ekstraktlar vortekslenmiş, buz üzerinde 8 dakika inkübe edilmiş ve ardından 20.000 g'de, 4°C'de 4 dakika santrifüj edilmiştir. Süpernatant çıkarılarak 2 mL'lik bir Eppendorf tüpüne aktarılmıştır. Pellet üzerine bir kez daha 500 μ L önceden soğutulmuş ekstraksiyon çözeltisi (metanol:kloroform:su (2.5:2:1 v/v/v)) eklenerek metabolitler tekrar ekstrakte edilmiştir. Ardından 300 μ L saf su eklenmiş ve faz ayrımı sağlamak için çözeltinin 20.000 g'de, 4°C'de 2 dakika santrifüj edilmiştir. Üst polar faz (metanol/su), ilk ekstraksiyon süpernatantı ile birleştirilmiş, SpeedVac (SCANVAC Cool Safe 110-4, SpeedVac vakum konsantratör; Labogene) ile kurutulmuş ve daha sonraki türevleme işlemleri için -80°C'de saklanmıştır. Türevleme için, kurutulmuş polar faz 20 μ L metoksilamin hidroklorür çözeltisi (40 mg/mL) içinde çözülmüş ve termoshaker'da 30°C'de 90 dakika inkübe edilmiştir. Her bir örneğe 80 μ L N-metil-N-(trimetilsilil) triflorasetamid (MSTFA) (Macherey Nagel, Almanya) eklenmiş ve örnekler 37°C'de 30 dakika termoshaker'da inkübe edilmiştir. Inkübasyon sonrası örnekler 2 dakika 14.000 g'de santrifüj edilmiş, GC-mikro viallere mikro insertler ile aktarılmış ve kıvrımlı kapaklarla kapatılmıştır. Örneklerle birlikte, C10'dan C40'a kadar çift sayılı alkanlardan oluşan ve MSTFA eklenmiş 60 μ L'lik bir retansiyon indeksi belirteç çözeltisi de hekzan içinde 50 mg/L konsantrasyonda hazırlanmıştır.

Birincil metabolitlerin GC-MS analizlerinde LECO Pegasus 4D GC × GC TOF-MS cihazı kullanılmıştır. Örnekler, alkanlar ve boş örnekler 230°C sabit sıcaklıkta split/splitless enjektör ile enjekte edilmiştir. Türevlenmiş örnekten 1 µL enjeksiyon hacmi ile, 1:5 ve 1:100 split oranları kullanılarak enjeksiyon yapılmıştır. GC ayrımı, taşıyıcı gaz olarak 1 mL/dk akış hızında helyum kullanılan bir HP-5MS kolonu (30 m × 0.25 mm × 0.25 mm; Agilent Technologies) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık 70°C’de 1 dakika izotermal olarak başlatılmış, ardından 9°C/dk hızla 330°C’ye kadar ısıtılmış ve sıcaklık burada 7 dakika tutulmuştur. Transfer hattı sıcaklığı 250°C olarak belirlenmiş, iyon kaynağı sıcaklığı ise 200°C olarak ayarlanmıştır. Kütle spektrumları, 1500 V dedektör voltajı ve 70 eV elektron darbesi iyonizasyonu kullanılarak 40–600 m/z aralığında ve 20 spektrum/s edinim hızı ile elde edilmiştir.

Veri analizi Chroma TOF yazılımı (Leco, Mönchengladbach, Almanya) ile yapılmıştır. Kısaca, farklı örneklerin temsilci kromatogramları, referans bileşikleri içeren kalite kontrol (QC) örneklerine dayanarak bir referans pik listesi oluşturmak amacıyla kullanılmış ve diğer tüm veri dosyaları bu referans listesine göre işlenmiştir. Dekonvolüsyonlu kütle spektrumları, kurum içi bir kütle spektral kütüphanesi ile eşleştirilmiştir. Pik anotasyonları ve pik entegrasyonları, göreceli kantifikasyon için pik alanlarının dışı aktarılmasından önce manuel olarak kontrol edilmiştir. Pik alanlarını normalize etmek için iç standart ve örneklerin taze ağırlığı kullanılmıştır. Metabolit miktarları, kromatogramların pik alanlarına karşılık gelen keyfi birimlerde verilmiştir (Zhang vd., 2021; Ghatak vd., 2022; Zhang vd., 2024).

3.5 İstatiksel Analizlerin Yapılması

Tüm parametrelerle ilgili istatistiksel değerlendirme SPSS 27 programı kullanılarak Duncan’s (1955) multiple range testine göre gerçekleştirilmiştir. Metabolomik verilerin analizi, elde edilen ham veriler homojenize edildikten sonra RStudio 4.3.0 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde ggplot2, tidyverse R paketlerinden yararlanılmıştır.

4 ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Yapılan tez çalışmasının materyal ve yöntem kısmında belirtildiği üzere tritikale (*×Triticosecale Wittmack*) çeşitlerinde kuraklık stresi fizyolojik (çimlenme yüzdesi, kök uzunluğu, gövde uzunluğu, dallanma sayısı, gövde çapı, yaprak genişliği ve bitki boyu), biyokimyasal (total protein miktarı, prolin miktarı, SOD, CAT, APX ve MDA aktivitesi) ve metabolomik bakımdan karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve çalışılan çeşitlerin kuraklık stresine direnç performansları ortaya konulmuştur.

4.1 Tritikalede Kuraklık Stresi Uygulamasının Çimlenme Üzerine Etkisi

Öncelikle, kuraklık stresi tolerans aralığını belirlemek ve mevcut çeşitleri karşılaştırmak amacıyla çeşitli PEG-6000 konsantrasyonlarında tohumlar çimlendirilmiştir (Çizelge 4.1). Elde edilen bulgulara göre %28 ve %30 PEG-6000 konsantrasyonları çeşitlerin tümünde toksik hatta bazı çeşitlerde lethal etki gösterirken, %26'lık konsantrasyon aralığında çeşitlerin tümü EC 50 değerinin altında kalmıştır. Tritikale çeşitleri %50 çimlenme oranını %24 PEG-6000 konsantrasyonu ile aşmışlardır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Tritikale (*× Triticosecale Wittmack*) çeşitlerinde 7 günlük çimlenme yüzdesi oranları ile kuraklık stresi (PEG-6000) konsantrasyonunun belirlenmesi

TRİTİKALE ÇEŞİDİ	PEG-6000 Konsantrasyonları ve Çimlenme oranları (%)									
	0 (Kontrol)	5	10	15	20	22	24	26	28	30
Ümran hanım	100	100	100	95	95	95	55	40	0	0
Bera	95	95	95	95	90	85	80	45	0	0
Melihbey	95	95	95	90	90	100	80	45	25	15
Melez-2001	95	90	90	90	90	95	60	40	5	0
Mikham-2002	100	100	100	100	100	100	74	42	30	0
Tatlıcak-97	100	100	95	95	95	95	60	15	5	0
Alperbey	100	90	90	85	84	78	76	44	5	0
Kinerit	100	95	85	85	85	80	55	10	0	0
Tacetinbey	100	100	100	100	95	90	50	40	30	5
Ege yıldızı	95	95	95	95	95	90	15	5	0	0
Karma-2000	100	100	95	90	84	80	80	44	30	0
Presto	100	95	95	95	95	95	90	30	10	5

Bc. Goran	90	90	90	90	90	90	40	5	0	0
Brehat	100	100	100	100	100	75	40	30	0	0
Trica	100	95	95	95	95	95	70	30	25	0
Tricanto	100	100	90	90	90	85	55	45	35	5
Buğday	100	100	95	90	90	90	72	30	6	0
Çavdar	100	100	100	100	100	96	88	66	50	30

Triticale ($\times$ *Triticosecale wittmack*) çeşitlerinin, 7 günlük petride kuraklık stresi uygulamasının çimlenme ve koleoptil yüzdeliklerine bakıldığında ebeveynlerine ve kontrol gruplarına kıyasla Alperbey, Karma-2000 ve Mikham-2002'nin kuraklık stresini aşmadaki başarısı görülmektedir. Trica ve Tatlıcak-97 ise kuraklık stresi ile mücadelede daha düşük seviyede yanıt vermişlerdir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4. -2 . Triticale ($\times$ *Triticosecale wittmack*) çeşitlerinde kuraklık stresi (PEG-6000) ve kontrol gruplarında çimlenme ve koleoptil yüzdesinin belirlenmesi

7. Gün Çimlenme %			7. Gün Koleoptil %		
Tritikale çeşitleri	Kuraklık Stresi (PEG-6000) (%)		Tritikale çeşitleri	Kuraklık Stresi (PEG-6000) (%)	
	0	24		0	24
Mikham-2002	98	66	Mikham-2002	100	79
Tatlıcak-97	94	60	Tatlıcak-97	96	62
Alperbey	98	70	Alperbey	98	77
Tacettinbey	80	62	Tacettinbey	87	63
Karma-2000	86	69	Karma-2000	88	67
Presto	82	65	Presto	90	66
Trica	80	60	Trica	88	56
Çavdar	92	84	Çavdar	92	80
Buğday	97	63	Buğday	97	60

4.2 Tritikalede Kuraklık Stresi Uygulamasının Fizyolojik Etkileri

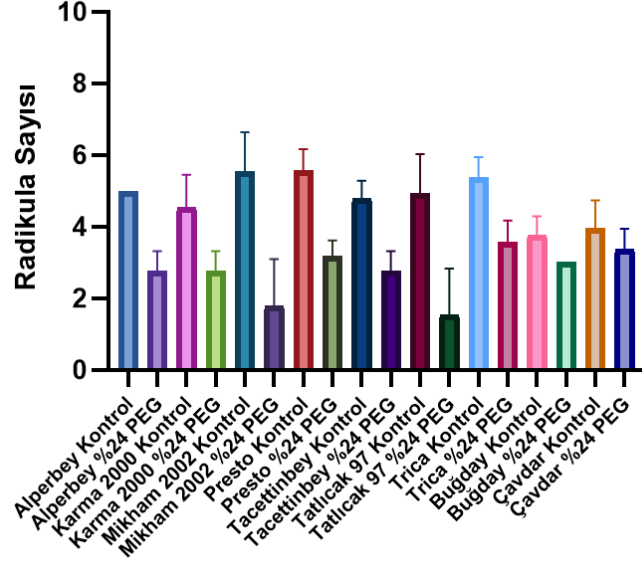
Alperbey, Karma-2000, Mikham-2002, Presto, Tacettinbey, Tatlıcak-97, Trica ve ebeveynleri olan buğday (*Triticum aestivum* L.) ve çavdarın (*Secale cereale* L.) tohumları 7 gün boyunca normal koşullarda ve %24 PEG-6000 kuraklık stresi koşulları altında petri kaplarında çimlendirilmişlerdir. Çalışılan fizyolojik parametrelere ilişkin bulgular Çizelge 4.3’de sunulmuştur.

Çizelge 4.-3 Kuraklık stresi uygulanan Tritikale çeşitlerinin 7 gün boyunca petri kaplarında çimlendirilmesi sonrası fizyolojik bulguları

Uygulama	Radikula sayısı	Radikula uzunluğu(cm)	Koleoptil uzunluğu(cm)	Taze ağırlık (g)
Alperbey Kontrol	5,00 ± 0,00 ^{hi}	9,94 ± 0,14 ^{def}	7,28 ± 0,22 ^{bc}	0,23 ± 0,01 ^a
Alperbey %24 PEG	2,80 ± 0,20 ^{bc}	0,90 ± 0,11 ^a	0,36 ± 0,02 ^a	0,08 ± 0,00 ^a
Karma-2000 Kontrol	4,60 ± 0,40 ^{gh}	11,18 ± 0,44 ^f	6,92 ± 0,26 ^b	0,19 ± 0,01 ^a
Karma-2000 %24 PEG	2,80 ± 0,20 ^{bc}	1,06 ± 0,18 ^a	0,30 ± 0,06 ^a	0,07 ± 0,00 ^a
Mikham-2002 Kontrol	5,60 ± 0,40 ⁱ	8,36 ± 0,51 ^{bc}	7,44 ± 0,33 ^{bcd}	0,19 ± 0,01 ^a
Mikham-2002 %24 PEG	2,00 ± 0,45 ^{ab}	1,34 ± 0,18 ^a	0,24 ± 0,02 ^a	0,08 ± 0,00 ^a
Presto Kontrol	5,60 ± 0,24 ⁱ	10,30 ± 0,47 ^{ef}	7,66 ± 0,29 ^{cd}	0,24 ± 0,01 ^a
Presto %24 PEG	3,20 ± 0,20 ^{cde}	1,80 ± 0,20 ^a	0,42 ± 0,06 ^a	0,08 ± 0,00 ^a
Tacettinbey Kontrol	4,80 ± 0,20 ^{ghi}	8,38 ± 0,96 ^{bc}	7,80 ± 0,30 ^{cde}	0,23 ± 0,01 ^a
Tacettinbey %24 PEG	2,80 ± 0,20 ^{bc}	0,78 ± 0,04 ^a	0,20 ± 0,03 ^a	0,09 ± 0,00 ^a
Tatlıcak-97 Kontrol	5,00 ± 0,45 ^{hi}	8,76 ± 0,47 ^{bcd}	7,44 ± 0,37 ^{bcd}	0,54 ± 0,31 ^b
Tatlıcak-97 %24 PEG	1,80 ± 0,49 ^a	1,14 ± 0,17 ^a	0,26 ± 0,02 ^a	0,07 ± 0,00 ^a
Trica Kontrol	5,40 ± 0,24 ^{hi}	9,28 ± 1,08 ^{bcd}	8,34 ± 0,35 ^e	0,27 ± 0,02 ^a
Trica %24 PEG	3,60 ± 0,24 ^{cde}	1,22 ± 0,16 ^a	0,38 ± 0,04 ^a	0,10 ± 0,00 ^a
Buğday Kontrol	3,80 ± 0,20 ^{def}	9,48 ± 0,49 ^{cde}	6,86 ± 0,29 ^b	0,18 ± 0,00 ^a
Buğday %24 PEG	3,00 ± 0,00 ^{cd}	0,72 ± 0,11 ^a	0,30 ± 0,00 ^a	0,07 ± 0,00 ^a
Çavdar Kontrol	4,00 ± 0,32 ^{efg}	7,96 ± 0,35 ^b	8,02 ± 0,25 ^{de}	0,12 ± 0,00 ^a
Çavdar %24 PEG	3,40 ± 0,24 ^{cde}	1,74 ± 0,12 ^a	0,64 ± 0,05 ^a	0,05 ± 0,00 ^a

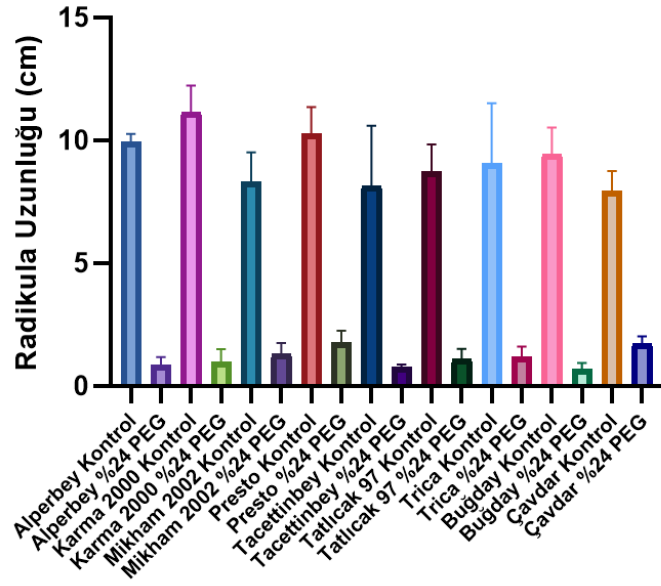
*Her bir parametre sütununda aynı harfle gösterilen değerler arasındaki fark ($p \leq 0,05$) düzeyinde önemsizdir. ± Standart sapma

Tüm çeşitlerde kuraklık stresinin olumsuz etkileri radikula sayısının azalmasıyla gözlenmiştir. Buna göre, Tatlıcak-97 ve Mikham-2002 çeşitlerinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının radikula sayısı %64 azalırken Trica ve Karma-2000 çeşitleri kontrol grubuna kıyasla sırasıyla %33 ve %39 azalmıştır. Buradan da kuraklık stresinden radikula sayısı açısından en çok etkilenen çeşitlerin Tatlıcak-97 ve Mikham-2002 olduğunu göstermiştir. Ancak, çavdarda radikula sayısı kontrol grubuna kıyasla %15 azalmıştır. Bu durum, çavdarın kuraklık toleransının tüm tritikale çeşitleri ile anne ebeveyn buğdaya göre daha yüksek olduğunu, Trica ve Karma-2000’in ebeveyn olan çavdara benzer özellik göstererek kuraklık stresinden en az etkilendiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.1).



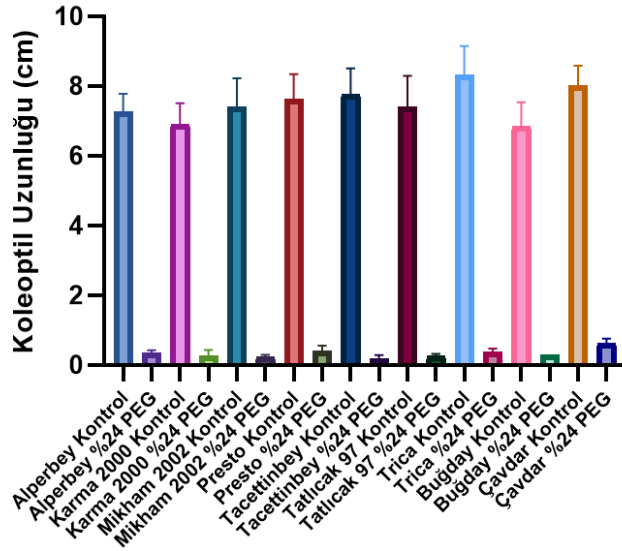
Şekil 4.1. Kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde radikula sayısının karşılaştırılması

Tacettinbey ve Alperbey çeşitlerinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının radikula uzunluğu %91 azalırken Mikham-2002 ve Presto çeşitleri kontrol grubuna kıyasla sırasıyla %84 ve %83 azalmıştır. Bu da kuraklık stresinde radikula uzunluğu açısından en çok etkilenen çeşitler olarak Tacettinbey ve Alperbey belirlenmiştir. Ancak, çavdarda radikula uzunluğu kontrol grubuna kıyasla %78 azalmıştır. Bu durum, çavdarın kuraklık toleransının tüm tritikale çeşitleri ile anne ebeveyn buğdaya göre daha yüksek olduğunu, Mikham-2002 ve Presto'nun ebeveyn olan çavdara benzer özellik göstererek kuraklık stresinden en az etkilendiği belirlenmiş ve istatistik açıdan tüm sonuçlar arasındaki far anlamlı bulunmuştur. Elde edilen bulgular, kuraklık stresinin çeşitler arasında farklı düzeylerde olumsuz etkiye sebep olduğunu göstermiştir (Şekil 4.2).



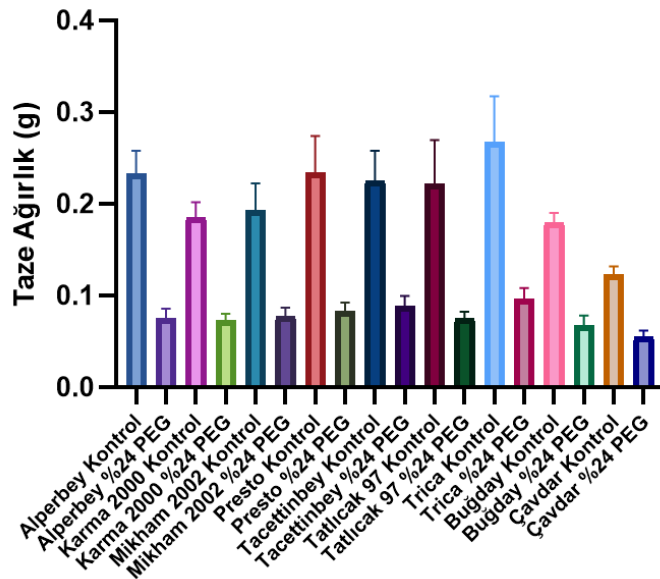
Şekil 4-2 Kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde radikula uzunluğunun karşılaştırılması

Elde edilen tüm fizyolojik bulgulara göre, kuraklık stresi, tüm tritikale çeşitlerinde koleoptil uzunluğunu önemli ölçüde azaltmıştır. Tacettinbey ve Tatlıcak-97 çeşitlerinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının koleoptil uzunluğu %97 azalırken Karma-2000 çeşidinin kontrol grubuna kıyasla koleoptil uzunluğu %86 azalmıştır. Bu da kuraklık stresinde koleoptil uzunluğu açısından en çok etkilenen çeşitlerin Tacettinbey ve Tatlıcak-97 olduğu belirlenmiştir. Ancak, Karma-2000 kuraklık stresinden en az etkilendiği belirlenmiştir. Yapılan istatistik değerlendirmeler sonucunda tüm çeşitlerde koleoptil uzunluğu bakımından kontrol grupları ile kuraklık stresi uygulanan gruplar arasında istatistik açıdan sonuçlar anlamlı bulunmuştur. Kuraklık stresi ile mücadele başarıları açısından diğer çeşitlere göre bu çeşit baba ebeveyn olan çavdara yakın değerler vermişlerdir (Şekil 4.3). Sonuç olarak, kuraklık stresinin koleoptil büyümesi üzerinde ciddi bir baskı oluşturduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.3. Kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde koleoptil uzunluğunun karşılaştırılması

Tüm tritikale çeşitlerinde taze ağırlık, kuraklık stresine maruz kaldıklarında kontrol gruplarına göre rakamsal olarak belirgin bir azalma göstermiştir. İstatistik açıdan değerlendirildiğinde, Mikham-2002 çeşidinin taze ağırlığının kontrol grubuna kıyasla %58 azalması ile kuraklık stresinden en az etkilenen çeşitken Tatlıcak-97'nin taze ağırlığının ise %87 azalması sonucunda kuraklık stresinden en çok etkilenen çeşit olmuştur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde taze ağırlığın karşılaştırılması

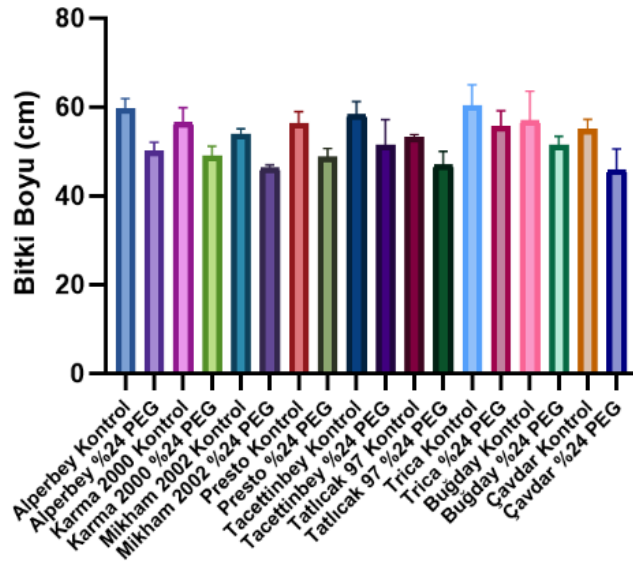
Saksıya aktarılan ve 21 günlük gelişimleri boyunca 7 gün kuraklık stresine maruz bırakılan ve stres uygulanmayan kontrol grubu tritikale çeşitlerinin fizyolojik bulguları Çizelge 4.4’de sunulmuştur.

Çizelge 4.-4 Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin fizyolojik bulguları

Uygulama	Bitki Boyu(cm)	Kök Sayısı	Kök Uzunluğu (cm)	Gövde Çapı (cm)	Yaprak Sayısı	Yaprak Alanı (cm ²)	Taze Ağırlık (g)
Alperbey Kontrol	59,70±1,25 ^{fg}	26,00±0,58 ^a	20,13±1,95 ^e	0,33±0,03 ^{cd}	5,33±0,33 ^{ab}	25,32±1,66 ^e	2,02±0,11 ^{bcdef}
Alperbey %24 PEG	50,17±1,08 ^{abc}	61,00±5,29 ^e	13,83±0,82 ^{bc}	0,23±0,03 ^{abc}	5,00±0,00 ^{ab}	13,57±1,07 ^{bc}	2,26±0,14 ^{cdef}
Karma 2000 Kontrol	56,63±1,83 ^{defg}	27,00±2,52 ^a	15,33±1,03 ^{bcd}	0,27±0,03 ^{abcd}	5,00±0,00 ^{ab}	15,48±4,87 ^{bc}	1,80±0,83 ^{bcde}
Karma 2000 %24 PEG	49,10±1,17 ^{ab}	36,00±7,02 ^{abc}	12,77±0,52 ^{ab}	0,20±0,00 ^{ab}	4,67±0,33 ^a	16,20±0,70 ^{bcd}	1,54±0,11 ^{abc}
Mikham 2002 Kontrol	53,87±0,67 ^{bcdef}	31,00±4,04 ^{ab}	17,03±0,42 ^{bcd}	0,37±0,03 ^d	7,67±0,33 ^{def}	13,40±1,14 ^{bc}	2,40±0,37 ^{def}
Mikham 2002 %24 PEG	46,30±0,35 ^a	35,00±6,35 ^{abc}	12,63±0,89 ^{ab}	0,30±0,05 ^{bcd}	7,00±0,58 ^{cde}	12,30±1,06 ^{abc}	1,38±1,99 ^{ab}
Presto Kontrol	56,37±1,47 ^{defg}	28,67±1,86 ^a	19,37±1,58 ^{de}	0,37±0,03 ^d	7,00±0,58 ^{cde}	18,89±1,42 ^{cde}	1,87±0,36 ^{bcde}
Presto %24 PEG	48,87±1,03 ^{ab}	45,00±3,21 ^{bcd}	14,03±0,77 ^{bc}	0,27±0,03 ^{abcd}	5,33±0,33 ^{ab}	15,48±1,35 ^{bc}	1,44±1,20 ^{abc}
Tacettinbey Kontrol	58,43±1,58 ^{efg}	27,67±2,40 ^a	17,13±1,45 ^{bcd}	0,27±0,07 ^{abcd}	5,67±0,33 ^{abc}	18,98±2,40 ^{cde}	1,99±0,20 ^{bcdef}
Tacettinbey %24 PEG	51,73±3,01 ^{abcd}	51,67±3,93 ^{de}	15,90±0,72 ^{bcd}	0,20±0,00 ^{ab}	5,00±0,00 ^{ab}	11,21±2,32 ^{ab}	1,49±0,19 ^{abc}
Tatlıcak 97 Kontrol	53,23±0,30 ^{bcd}	37,33±1,45 ^{abc}	16,84±0,84 ^{bcd}	0,33±0,03 ^{cd}	8,33±0,88 ^{ef}	17,53±3,23 ^{bcd}	2,77±0,27 ^f
Tatlıcak 97 %24 PEG	47,13±1,66 ^a	56,67±2,03 ^{de}	13,73±1,74 ^{bc}	0,23±0,03 ^{abc}	6,33±0,33 ^{bcd}	12,17±1,02 ^{abc}	2,54±0,44 ^{ef}
Trica Kontrol	60,50±2,50 ^g	52,67±6,84 ^{de}	19,00±1,66 ^{de}	0,27±0,03 ^{abcd}	5,00±0,00 ^{ab}	22,59±2,79 ^{de}	2,62±0,42 ^{ef}
Trica %24 PEG	55,80±1,93 ^{cdefg}	49,33±5,78 ^{cde}	16,17±1,07 ^{bcd}	0,20±0,00 ^{ab}	5,00±0,00 ^{ab}	18,47±2,34 ^{cd}	1,60±0,36 ^{abcd}
Buğday Kontrol	57,30±3,50 ^{defg}	55,67±2,60 ^{de}	17,17±2,65 ^{bcd}	0,23±0,03 ^{abc}	5,67±0,33 ^{abc}	18,68±0,67 ^{cd}	1,90±0,30 ^{bcde}
Buğday %24 PEG	51,47±1,07 ^{abcd}	49,00±6,03 ^{cde}	18,07±0,98 ^{cde}	0,20±0,00 ^{ab}	5,00±0,00 ^{ab}	13,58±0,87 ^{bc}	1,27±0,09 ^{ab}
Çavdar Kontrol	54,97±1,29 ^{cdefg}	47,67±4,98 ^{cde}	15,40±2,28 ^{bcd}	0,33±0,03 ^{cd}	8,67±0,88 ^f	14,20±2,08 ^{bc}	1,43±0,24 ^{abc}
Çavdar %24 PEG	46,10±2,57 ^a	43,33±3,84 ^{bcd}	8,93±0,48 ^a	0,17±0,03 ^a	6,00±1,00 ^{abc}	6,71±1,59 ^a	0,87±0,31 ^a

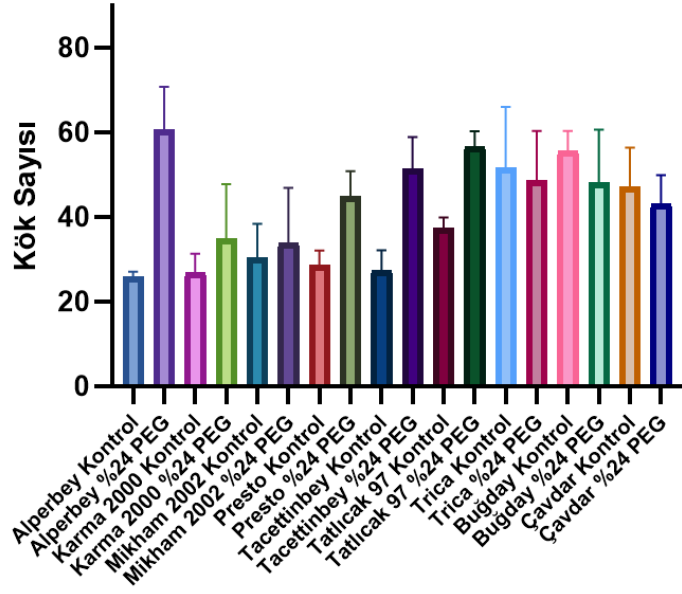
*Her bir parametre sütununda aynı harfle gösterilen değerler arasındaki fark ($p \leq 0,05$) düzeyinde önemsizdir. $\pm$ Standart sapma

21 gün saksıda yetiştirilen Trica çeşidinin bitki boyu kontrol grubuna kıyasla %7 azalması ile kuraklık stresinden en az etkilenen çeşitken Alperbey’in bitki boyunun %16 azalması sonucunda kuraklık stresinden en çok etkilenen çeşit olmuştur. Bitki boyunun kuraklık stresi uygulamasının olumsuz etkilediği istatistik olarak da anlamlı farklar ile ortaya konulmuştur (Şekil 4.5).



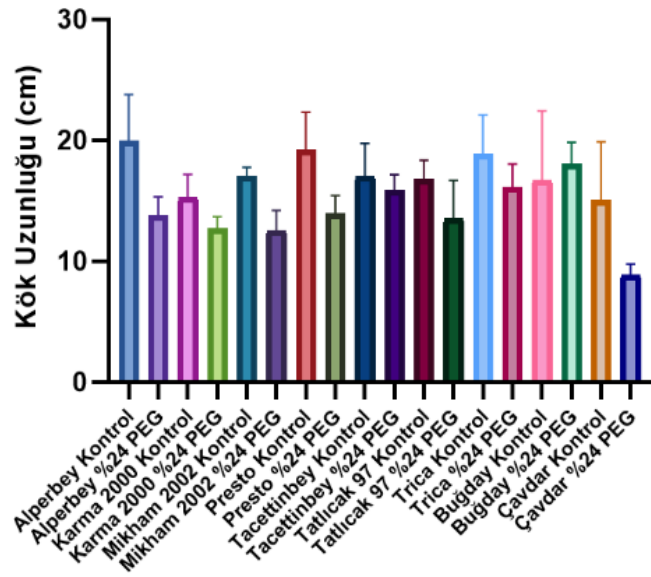
Şekil 4.5. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde bitki boyunun karşılaştırılması

21 gün saksıda yetiştirilen tüm çeşitlerde kuraklık stresini yenmede tritikalede kök sayısının artırma yönünde adaptasyon gözlenmiştir. Trica çeşidinin kök sayısının kontrol grubuna kıyasla %6 azalması ile kuraklık stresinden en çok etkilenen çeşitken Alperbey'in bitki boyunun %134 artması sonucunda kuraklık stresinden en az etkilenen çeşit olmuştur, kuraklık stresi altında suya ulaşmak için alternatif kök sayısını artırma yönünde bir adaptasyon gerçekleştirmiştir. Elde edilen bulgular istatistik açıdan anlamlı farklar ile ortaya konulmuştur (Şekil 4.6.).



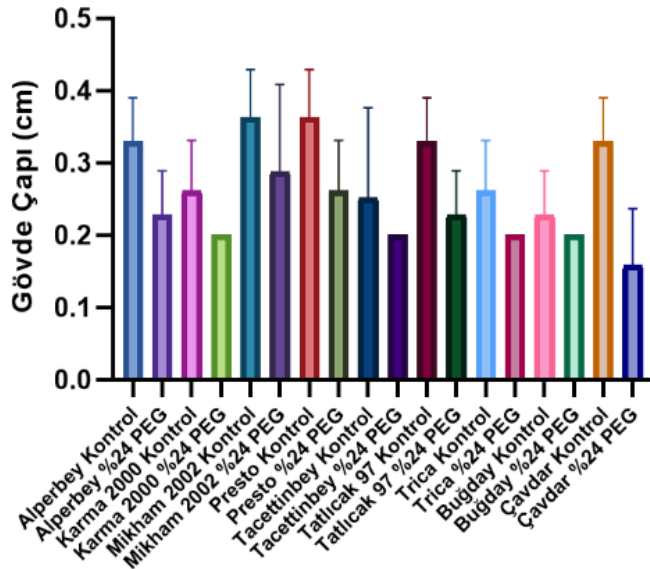
Şekil 4.6.Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde kök sayısının karşılaştırılması

21 gün saksıda yetiştirilen Alperbey çeşidinin kök uzunluğunun kontrol grubuna kıyasla %31 azalması ile kök sayısını arttırıp kök uzunluğunda azalma gösterme yönünde bir eğilim göstermiştir aynı zamanda kuraklık stresinden en az etkilenen çeşitken Tacettinbet'in kök uzunluğunun %7 azalması sonucunda kök sayısını azaltıp kök uzunluğunda artış gösterme yönünde bir eğilim göstermiştir aynı zamanda kuraklık stresinden en çok etkilenen çeşit olmuştur. Sonuç olarak, kök uzunluğunun kuraklık stresi uygulamasını tüm çeşitlerde olumsuz etkilediği istatistik olarak da anlamlı farklar ile ortaya konulmuştur (Şekil 4.7.).



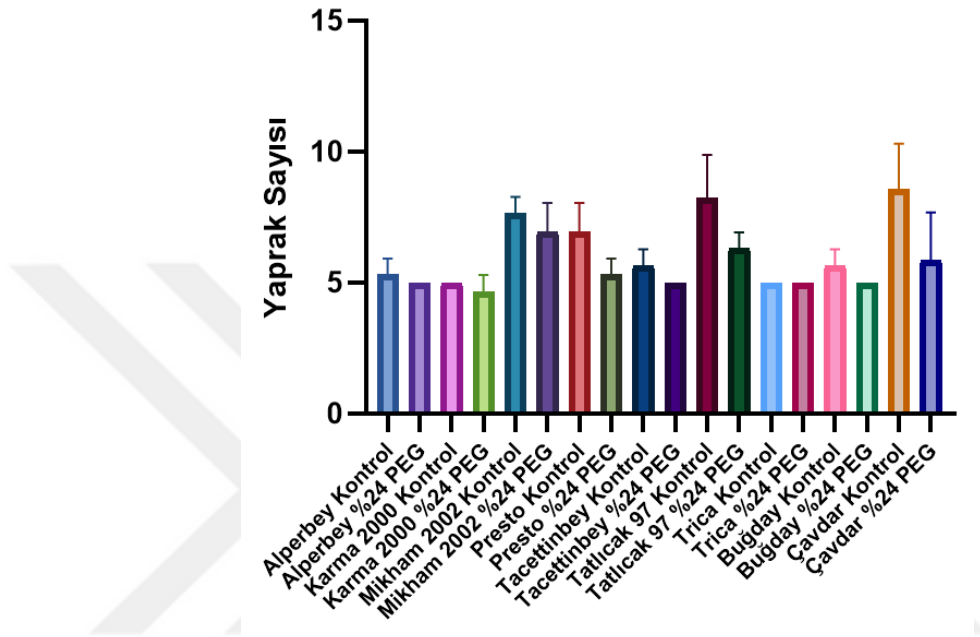
Şekil 4-7 Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde kök uzunluğunun karşılaştırılması

Tüm çeşitler gövde çapı açısından kuraklık stresinden olumsuz etkilenmiştir. Ancak Mikham-2002 ve Karma-2000 çeşitleri kontrol gruplarıyla karşılaştırıldığında gövde çapı özelliği açısından sırası ile %19 ve %25 azalma göstermiş olup kuraklık stresinden en az etkilenen çeşitler olarak belirlenmiştir (Şekil 4.8).



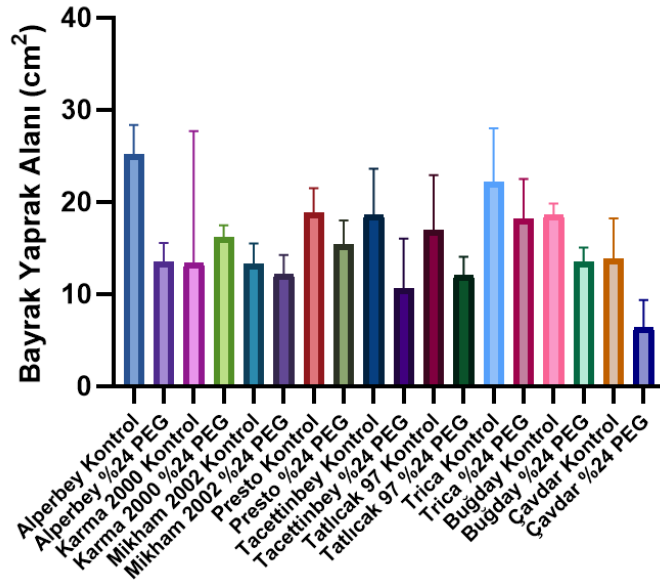
Şekil 4.8. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde gövde çapının karşılaştırılması

Tatlıcak-97 ve Presto çeşidinin yaprak sayısı kontrol grubuna kıyasla %24 azalma ile kuraklık stresinden en çok etkilenen çeşitlerken Alperbey ve Karma-2000'in yaprak sayısı sırası ile %6 ve %7 artması sonucunda kuraklık stresinden en az etkilenen çeşit olmuştur. Buda yaprak sayılarının bitkinin kuraklık stresi ile mücadelesinde olumsuz etkilendiğini ortaya koymuştur (Şekil 4.9.).



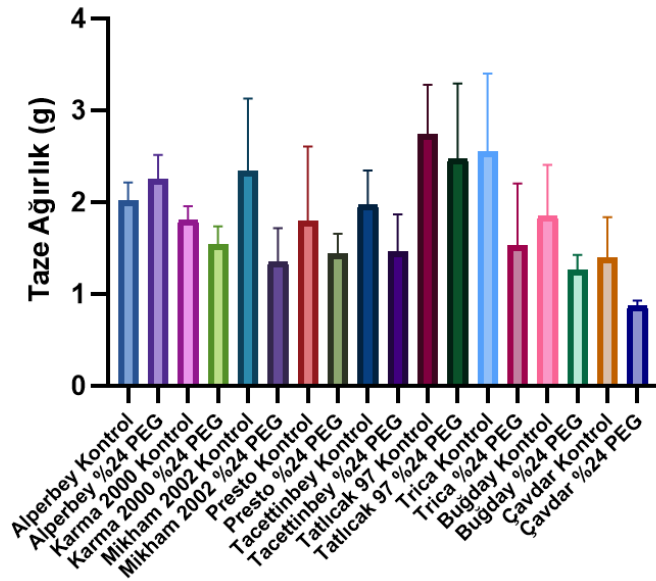
Şekil 4.9. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde yaprak sayısının karşılaştırılması

Yapılan fizyolojik değerlendirmeler sonucunda yaprak alanı Tacettinbey ve Alperbey çeşidinin kontrol grubuna kıyasla sırası ile %41, %46 azalması ile kuraklık stresinden en çok etkilenen çeşitlerken Karma-2000'in yaprak sayısı %5 artması sonucunda kuraklık stresinden en az etkilenen çeşit olmuştur. Buna göre, yaprak alanının kuraklık stresinden olumsuz etkilendiğini ve elde edilen tüm sonuçların istatistik açıdan önemli olduğunu göstermiştir (Şekil 4.10.).



Şekil 4-10 Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde yaprak alanının karşılaştırılması

Taze ağırlık özelliği bakımından Mikham-2002 çeşitlerinin kontrol grubuna kıyasla %42 azalması ile kuraklık stresinden en çok etkilenen çeşit olduğunu gösterirken Alperbey çeşidinin taze ağırlığının %11 artması sonucunda kuraklık stresinden en az etkilenen çeşit olduğu gözlenmiştir. Bu da taze ağırlığın tüm çeşitlerde kuraklık stresi uygulaması altında azaldığını ve istatistik olarak da anlamlı farkların elde edildiğini göstermiştir. (Şekil 4.11.).



Şekil 4.11. Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde taze ağırlığın karşılaştırılması

4.3 Tritikalede Kuraklık Stresi Uygulamasının Biyokimyasal Aktivite Üzerine Etkileri

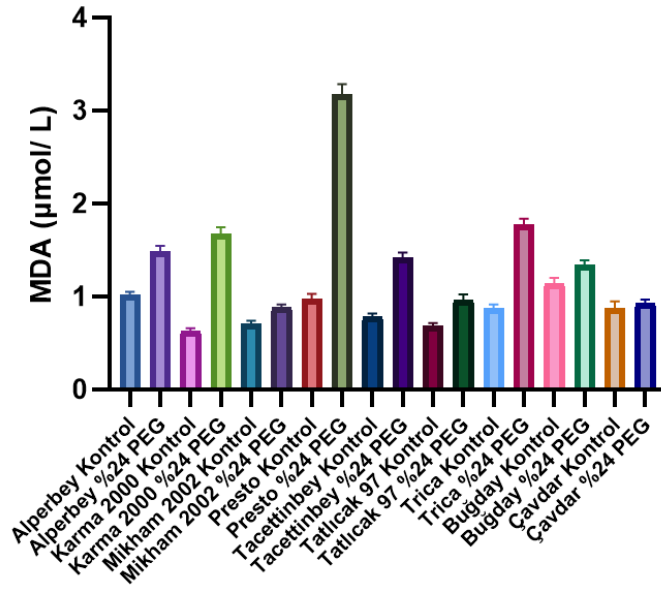
21 günlük gelişim periyotları boyunca, 14 gün normal koşullarda yetiştirilen fidelerin, 7 gün boyunca kuraklık stresine maruz bırakılan ve kontrol grubuna ait biyokimyasal değişimleri Çizelge 4.5’de sunulmuştur.

Çizelge 4.-5 Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin biyokimyasal açıdan karşılaştırmaları

Uygulama	MDA ($\mu\text{mol/L}$)	PROLİN (μM prolin/g doku)	SOD ($\mu\text{M/L}$)	Total Protein(mg/ mL)	APX ($\mu\text{mol dk-1 mg}$)	CAT ($\mu\text{mol dk-1 mg}$)
Alperbey Kontrol	1,01 $\pm$ 0,02 ^d	5,08 $\pm$ 0,09 ^e	0,19 $\pm$ 0,00 ^a	6,66 $\pm$ 0,05 ^d	7,24 $\pm$ 3,21 ^{ab}	37,61 $\pm$ 8,40 ^a
Alperbey %24 PEG	1,48 $\pm$ 0,03 ^e	7,86 $\pm$ 0,09 ^f	0,42 $\pm$ 0,00 ^e	7,29 $\pm$ 0,11 ^d	17,88 $\pm$ 6,02 ^{abc}	38,63 $\pm$ 1,90 ^a
Karma 2000 Kontrol	0,63 $\pm$ 0,02 ^a	2,38 $\pm$ 0,28 ^a	0,27 $\pm$ 0,00 ^b	4,20 $\pm$ 0,09 ^{bc}	15,65 $\pm$ 2,76 ^{abc}	79,65 $\pm$ 19,00 ^a
Karma 2000 %24 PEG	1,67 $\pm$ 0,04 ^h	9,52 $\pm$ 0,08 ^k	0,50 $\pm$ 0,00 ^h	6,28 $\pm$ 0,64 ^d	19,36 $\pm$ 5,27 ^{abc}	108,18 $\pm$ 16,96 ^{abc}
Mikham 2002 Kontrol	0,71 $\pm$ 0,02 ^{ab}	2,41 $\pm$ 0,04 ^a	0,17 $\pm$ 0,02 ^a	2,45 $\pm$ 0,03 ^a	25,84 $\pm$ 10,12 ^{abc}	259,79 $\pm$ 60,35 ^{bcd}
Mikham 2002 %24 PEG	0,88 $\pm$ 0,02 ^c	6,96 $\pm$ 0,10 ⁱ	0,34 $\pm$ 0,01 ^c	2,76 $\pm$ 0,02 ^{ab}	30,16 $\pm$ 16,70 ^{bc}	463,23 $\pm$ 95,90 ^e
Presto Kontrol	0,98 $\pm$ 0,03 ^d	2,40 $\pm$ 0,06 ^a	0,42 $\pm$ 0,00 ^e	2,84 $\pm$ 0,07 ^{ab}	26,20 $\pm$ 10,91 ^{abc}	212,99 $\pm$ 104,84 ^{abcd}
Presto %24 PEG	3,17 $\pm$ 0,06 ^j	2,63 $\pm$ 0,03 ^{ab}	0,50 $\pm$ 0,00 ^h	2,70 $\pm$ 0,04 ^a	34,66 $\pm$ 7,21 ^c	343,04 $\pm$ 121,78 ^{de}
Tacettinbey Kontrol	0,78 $\pm$ 0,02 ^b	2,91 $\pm$ 0,05 ^{bc}	0,46 $\pm$ 0,00 ^{fg}	7,53 $\pm$ 0,14 ^d	3,45 $\pm$ 1,09 ^a	46,58 $\pm$ 21,10 ^a
Tacettinbey %24 PEG	1,42 $\pm$ 0,03 ^{fg}	6,96 $\pm$ 0,08 ⁱ	0,48 $\pm$ 0,00 ^{gh}	3,86 $\pm$ 0,09 ^{abc}	18,62 $\pm$ 7,43 ^{abc}	51,90 $\pm$ 3,97 ^a
Tatlacak 97 Kontrol	0,68 $\pm$ 0,02 ^a	3,51 $\pm$ 0,09 ^{de}	0,27 $\pm$ 0,03 ^b	3,05 $\pm$ 0,01 ^{abc}	8,99 $\pm$ 1,06 ^{ab}	53,26 $\pm$ 6,15 ^a
Tatlacak 97 %24 PEG	0,97 $\pm$ 0,03 ^{cd}	4,39 $\pm$ 0,30 ^f	0,37 $\pm$ 0,00 ^d	2,77 $\pm$ 0,05 ^{ab}	32,76 $\pm$ 7,08 ^{bc}	100,67 $\pm$ 36,64 ^{ab}
Trica Kontrol	0,88 $\pm$ 0,02 ^c	3,10 $\pm$ 0,07 ^{cd}	0,44 $\pm$ 0,01 ^{ef}	3,80 $\pm$ 0,13 ^{abc}	20,64 $\pm$ 6,28 ^{abc}	64,74 $\pm$ 15,06 ^a
Trica %24 PEG	1,77 $\pm$ 0,04 ⁱ	3,46 $\pm$ 0,03 ^{de}	0,47 $\pm$ 0,00 ^{fg}	3,50 $\pm$ 0,09 ^{abc}	16,30 $\pm$ 3,71 ^{abc}	144,36 $\pm$ 70,20 ^{abc}
Buğday Kontrol	1,14 $\pm$ 0,03 ^e	3,59 $\pm$ 0,01 ^e	0,44 $\pm$ 0,00 ^{ef}	2,64 $\pm$ 0,18 ^a	19,25 $\pm$ 3,69 ^{abc}	79,35 $\pm$ 3,76 ^a
Buğday %24 PEG	1,34 $\pm$ 0,03 ^f	3,69 $\pm$ 0,08 ^e	0,50 $\pm$ 0,00 ^h	3,03 $\pm$ 0,06 ^{abc}	21,63 $\pm$ 10,29 ^{abc}	273,27 $\pm$ 47,38 ^{cd}
Çavdar Kontrol	0,88 $\pm$ 0,04 ^c	6,32 $\pm$ 0,13 ^h	0,48 $\pm$ 0,00 ^{gh}	4,43 $\pm$ 1,72 ^c	17,75 $\pm$ 4,74 ^{abc}	44,37 $\pm$ 11,70 ^a
Çavdar %24 PEG	0,92 $\pm$ 0,02 ^{cd}	14,89 $\pm$ 0,31 ^l	0,50 $\pm$ 0,01 ^h	3,07 $\pm$ 0,14 ^{abc}	21,52 $\pm$ 7,72 ^{abc}	92,28 $\pm$ 37,19 ^{ab}

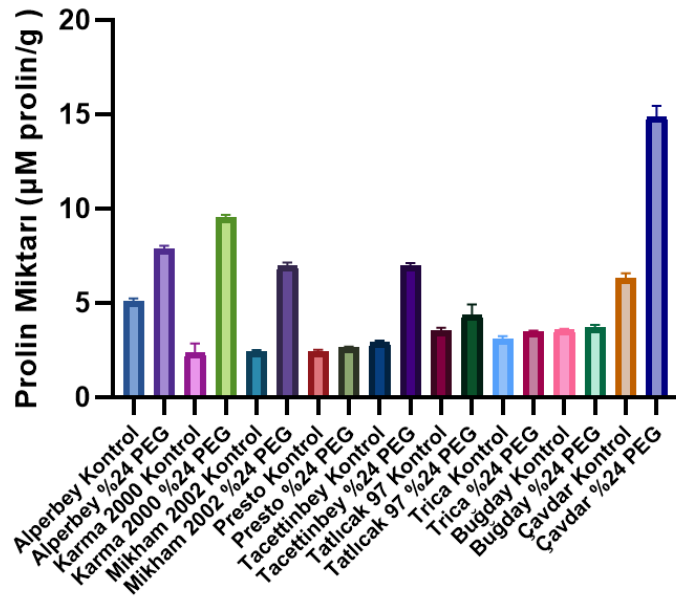
*Her bir parametre sütununda aynı harfle gösterilen değerler arasındaki fark ($p \leq 0,05$) düzeyinde önemsizdir. $\pm$ Standart sapma

Tritikale çeşitlerinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi altında yüksek MDA miktarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Karma-2000 çeşidinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının MDA miktarı %165 artmıştır. Buna rağmen, Presto çeşidinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının MDA miktarı %223 artmıştır. Tacettinbey çeşidinin ise kuraklık stresi uygulamasının kontrol grubuna kıyasla MDA miktarı %82 artmıştır. Tatlacak-97 çeşidinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının MDA miktarı %43 artmıştır. Trica çeşidinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının MDA miktarı %101 artmıştır. Ebeveynleri olan buğdayın kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının MDA miktarı %17 artarken çavdarın ise %4 artmıştır ve tüm çeşitler arasında istatistik açıdan anlamlı sonuçlar ortaya konulmuştur (Şekil 4.12.).



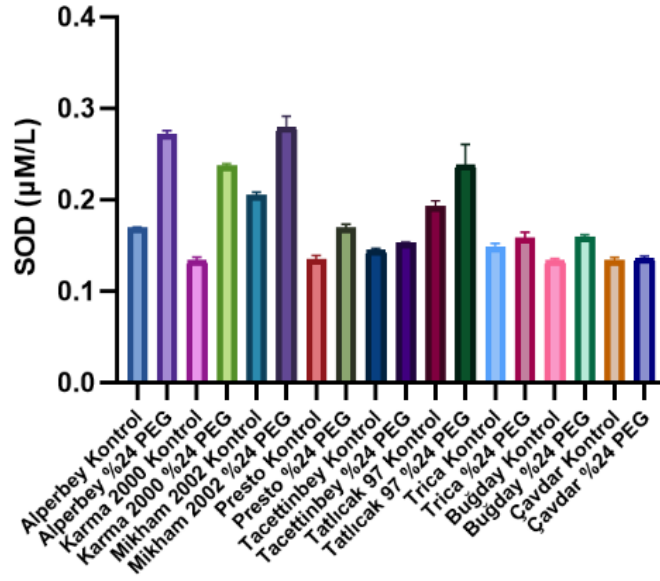
Şekil 4-12 Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde malondialdehit miktarının (MDA) karşılaştırılması

Tüm çeşitlerde kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi altında prolin miktarında artış tespit edilmiştir. Alperbey çeşidinin prolin miktarı kuraklık stresi altında %55 artarken Karma-2000 çeşidinin %300 artmıştır. Yine Mikham-2002 çeşidinin prolin miktarı %189 artış gösterirken Tacettinbey çeşidinin prolin miktarı %140 artış olarak ortaya konulmuştur. Trica çeşidinin kuraklık stresine tepkisi tüm çeşitler içerisinde en düşük seviyede %12 artış ile değerlendirilmiştir. Ebeveynleri olan buğdayın kuraklık stresi uygulaması altında prolin miktarı kontrol grubuna oranla %3 artarken çavdarın %136 artmıştır. Tritikale çeşitlerinde Karma-2000 kuraklık stresi ile başa çıkma kapasitesini en fazla arttıran çeşit iken Presto ebeveynleriyle kıyaslandığında buğdaya benzerlik göstererek stresle başa çıkma kapasitesi en düşük çeşit olduğu istatistik olarak da anlamlı farklar ile ortaya konulmuştur (Şekil 4.13.).



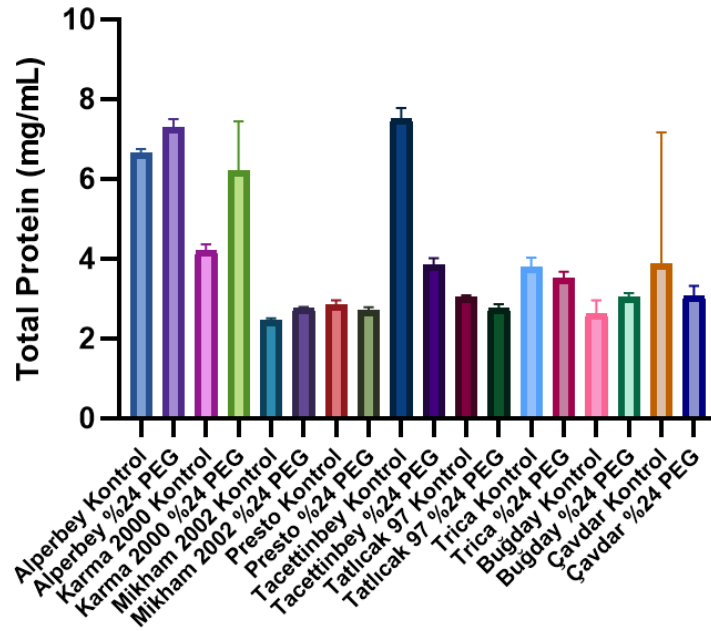
Şekil 4-13 Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde prolin miktarının karşılaştırılması

Tüm çeşitlerde kuraklık stresinin olumsuz etkileri ile mücadelede antioksidan aktivite gösteren enzimlerin miktarı artmıştır. Buna göre, Alperbey çeşidinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulamasının SOD miktarı %59 artarken bu değer Karma-2000 çeşidinde %85, Mikham-2002 %40 artmıştır. Buna karşın Tacettinbey ve Trica çeşitlerinin SOD miktarı %7 kat artış ile kuraklık stresinde savunma mekanizmasında görevli enzim aktivitesi açısından en çok etkilenen çeşitler olarak belirlenmiştir. Tritikale çeşitlerinde SOD aktivitesi bakımından Karma-2000 kuraklık stresi ile mücadelede en yüksek etkiyi gösteren çeşit olarak ortaya konulmuştur (Şekil 4.14.).



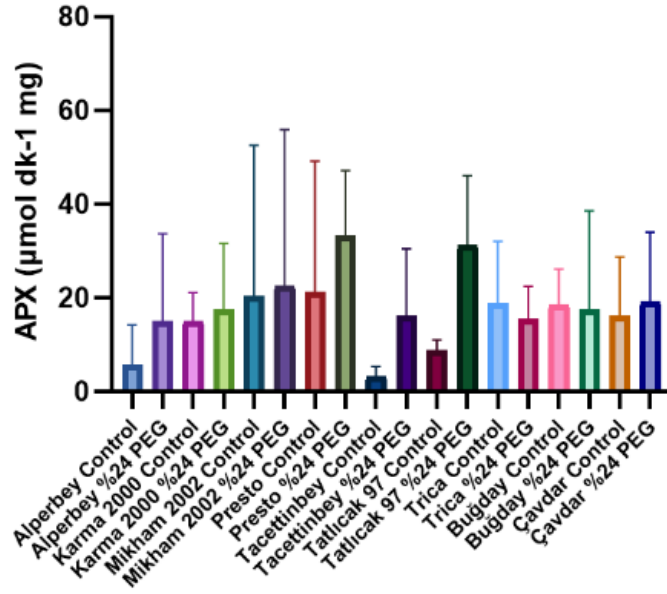
Şekil 4-14 Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde SOD miktarının karşılaştırılması

Alperbey çeşidinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresine tepkisi sonucu total protein miktarı %9 artmıştır. Karma-2000 çeşidin de ise bu durum %50 artmış, Presto çeşidinde ise %5 kat azalmıştır. Aynı şekilde Tacettinbey, Tatlıcak-97 ve Trica çeşitlerinde de total protein miktarı kuraklık stresi altında sırasıyla %49; %9 ve %8 azalmıştır. Ebeveynleri olan buğdayın kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi altında total protein miktarı %15 artarken çavdarda %31 azalmıştır (Şekil 4.15.).



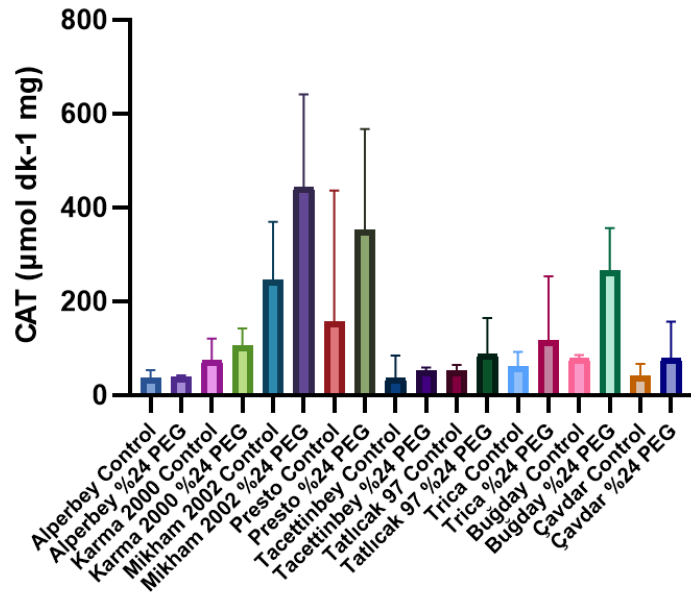
Şekil 4.15.Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde total protein miktarının karşılaştırılması

Tritikalenin tüm çeşitlerinin genellikle kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi altında yüksek APX miktarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Alperbey çeşidinin kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi altında APX miktarı %147 artmıştır. Karma-2000 ve Presto çeşitlerinin %24 ve %32 artmıştır. En yüksek değerde artış Tacettinbey çeşidinde kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi altında %440 APX miktarı artışı ile tespit edilmiştir. Trica çeşidinde ise kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi altında APX miktarı %21 azalmıştır. Tritikale çeşitlerinde APX aktivitesinde Tacettinbey kuraklık stresi ile mücadelede en fazla etkiyi gösteren çeşit iken Trica ise ebeveynlerine kıyaslandığında kuraklık stresi ile mücadelede en az etkiyi gösteren çeşit olarak tespit edilmiş ve istatistik açıdan tüm çeşitler arasında anlamlı farklar bulunmuştur (Şekil 4.16.).



Şekil 4-16 Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde APX aktivitesinin karşılaştırılması

Kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi altında artan CAT miktarı seviyesi tüm çeşitlerde benzer şekilde tespit edilmiştir. Alperbey %3, Karma-2000 %36, Mikham-2002 %78 artmıştır. Buna rağmen, Trica çeşidinin CAT aktivitesi kuraklık stresi ile mücadelesinde %123 azalmıştır. Bu durum da Trica çeşidini kuraklık stresi ile mücadelede en fazla etkiyi gösteren çeşit olarak yansıtırken Alperbey ise ebeveynlerine kıyaslandığında kuraklık stresi ile mücadelede en az etkiyi gösteren çeşit olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.17.).



Şekil 4-17 Saksıda 21 gün yetiştirilerek kuraklık stresi uygulanmış ve stres uygulanmamış tritikale çeşitlerinde CAD miktarı seviyesinin karşılaştırılması

Kuraklık stresi, bitki yetiştiricileri ve araştırmacılar için mücadele stratejilerinin geliştirilmesi bakımından önemli bir zorluk olarak varlığını sürdürmektedir. 2025 yılına kadar yaklaşık 1.8 milyar insanın mutlak su kıtlığıyla karşı karşıya kalacağı ve dünya nüfusunun %65'inin su stresi altındaki ortamlarda yaşayacağı varsayılmaktadır (Nezhadahmadi vd., 2013). Bu nedenle, tahıl ürünlerinin abiyotik strese nasıl tepki verdiğini anlamak oldukça önemlidir. Abiyotik stresin önemli özelliklerini ve bunların altında yatan fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler temelleri (örneğin genetik, epigenetik, transkriptomik ve metabolomik) anlamak, abiotik strese dayanıklı ürünler geliştirme çabalarımızdaki bilgimizi her geçen gün genişletmektedir (Zhao vd., 2023). Su kıtlığıyla başa çıkmak için bitkiler, türe özgü farklılık gösteren fizyolojik ve biyokimyasal tepkiler de dahil olmak üzere çeşitli karmaşık direnç ve adaptasyon mekanizmalarını her generasyonda ortaya koymaktadırlar. Büyüme deseni ve yapısal dinamikler, stoma iletkenliğini ve dağılımını değiştirerek terleme kaybında azalma, yaprak kıvrılması, kök-sürgün oranı dinamikleri, kök uzunluğu artışı, uyumlu çözünen maddelerin birikimi, terleme verimliliğinde artış, ozmotik ve hormonal düzenleme ve gecikmiş yaşlanma, su eksikliği olan bitkiler tarafından benimsenen stratejilerdir (Seleiman vd., 2021).

Çalışmamızda, Türkiye ve İtalya'da yetiştirilen 13 farklı tritikale çeşidinin kuraklık stres toleransları, fizyolojik ve biyokimyasal parametreler açısından değerlendirilmiş ve ebeveynleri buğday (♀) ve çavdar (♂) ile karşılaştırmalı olarak ilişkilendirilmiştir. Yapılan tez çalışmasında 7 günlük kuraklık stresi altında çimlendirilen tritikale

çeşitlerinin çimlenme ve koleoptil yüzdelikleri kontrol grubuna kıyasla düşük yüzdelikler göstermekte bu da kuraklık stresini çimlenme ve koleoptil oluşumunu olumsuz etkilediğini göstermektedir. 7 gün sonraki çimlenme/koleoptil yüzdesine göre kuraklık stresine en dayanıklı genotipler Alperbey, Mikham-2002 ve Karma-2000 olurken, en hassas fenotipi Trica göstermiştir. Yapılan çalışmalarda çimlenme yüzdeliği ve koleoptil oluşumunun kuraklık stresinden olumsuz etkilendiği gözlenmektedir. Benzer şekilde, 21 gün saksıda yetiştirilen ve kuraklık uygulamaları ardından koleoptil uzunluğu (cm), radikula sayısı, radikula uzunluğu(cm), taze ağırlık(g), bitki boyu (cm), kök uzunluğu (cm), yaprak sayısı, yaprak alanı (cm²), gövde çapı (cm) özellikleri değerlendirilen fidelerde kuraklık stresinin bitkide gelişim kısıtlamasına sebebiyet verdiği ve kuraklığa tepki olarak bitki boyunda, yapraklarında, taze ağırlığında azalmaya giderek morfolojik adaptasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Mikham-2002 ve Tacettinbey'in hassas genotiplere sahip olduğu, Trica, Alperbey ve Presto'nun ise 21 günlük saksı denemelerinin fizyolojik sonuçlarına bağlı olarak dayanıklı genotipler olduğu bulunmuştur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde kuraklık stresi uygulanan bitkilerde bitki büyümesi, bitki boyu, yaprak sayısı, kök sayısı, kök uzunluğu açısından azalmıştır (Rasouli vd., 2024; Ghimire vd., 2024; Aghaei vd., 2025; Su vd., 2024). Özellikle, PEG-6000 kaynaklı ozmotik stres, ana eksen ve yanıl köklerin uzunluğunu ve hem yanıl köklerin hem de primer kökün kök tüylerinin çapını ve yoğunluğunu artırarak kardeş başına kök kuru ağırlığını artırdığı bildirilmiştir (Robin vd., 2021). PEG-6000 kaynaklı stres altında, tritikale fideleri kök morfolojisinde, artan kök kuru ağırlığı ve değişen kök kılı özellikleri de dahil olmak üzere değişiklikler göstermektedir. Bu adaptasyonların, su alımını sürdürmek ve ozmotik stres altında bitki büyümesini desteklemek için çok önemli olduğu bildirilmiştir (Dai-zhen, 2007). Ayrıca tüm bu parametrelerin aksine tritikale fidelerinde kuraklık stresi uygulamasının, kök sayısında kontrol grubuna kıyasla artış gösterdiği bitkinin suya ulaşabilmek için kök sayılarını arttırmak yönünde bir adaptasyon olarak ortaya konulmuştur.

21 gün kuraklık stresine maruz bırakılan tritikale fidelerinin biyokimyasal aktiviteleri kontrol grubuna kıyasla; MDA seviyesindeki artış, lipid peroksidasyonunu arttırdığını ve hücre zarında meydana gelen hasar sonucunda bitkinin morfolojik olarak zarar gördüğünü göstermektedir. SOD, CAT ve APX enzim aktivitelerindeki artış ise bitkinin oksidatif stresle başa çıkma kabiliyetini göstermektedir. Prolin miktarındaki artış ise bitkinin stresle başa çıkmasında gelişen adaptasyon olarak görülmektedir. Yapılan çalışmalar biyokimyasal analizler destekler nitelikte ve benzer paralelliktedir. Demirbaş

ve Balkan (2017) ülkemizde yaygın olarak yetiştirilen 4 Tritikale çeşidi (Karma-2000, Presto-2000, Tatlıcak-97 ve Mikham-2002) ile yapmış oldukları çalışmada, hidrojen peroksit (H₂O₂) uygulamasının morfolojik ve fizyolojik etkilerini değerlendirmiş ve Tatlıcak-97 ve Presto-2000 çeşitlerinin en yüksek değerlere sahip çeşitler olduğu bildirilmiştir. Shanazari vd. (2018), yapmış olduğu çalışmada kuraklık stresi altında tritikale genomunda gelişmiş hücre zarı mekanizması nedeniyle, prolin ve LSC içeriğini artıran hücresel süreçlerin H₂O₂ ve MDA üretimini azaltmada daha etkili olduğu ve böylece su stresi altında bitki hücresi hasarlarını azalttığı sonucuna varılabileceğini bildirmişlerdir. Riasat vd. (2019) kuraklık stresinin, su eksikliği nedeniyle bitkilerde ROT üretimini artırarak oksidatif hasara neden olduğunu bildirmişlerdir. Bu durum, lipid peroksidasyonu ve hücresel bileşenlerde hasara yol açarken, toleranslı genotiplerde, SOD, CAT ve APX gibi antioksidan enzimlerin daha yüksek aktiviteleri, ROT seviyelerini kontrol altında tutarak hücre hasarının sınırlandırılması ile ortaya çıkmıştır. Bu enzimlerin aktivitesi, kuraklık stresine dayanıklı genotiplerin belirlenmesinde önemli bir biyokimyasal gösterge olarak kullanılabilir. Uluişik ve Öney-Birol (2021), ülkemizde yetiştirilen 13 tritikale çeşidi üzerinde tuz stresinin etkilerinin belirlenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada fizyolojik ve biyokimyasal açıdan prolin ve malondialdehit (MDA) seviyeleri, tuz konsantrasyonunun artışına bağlı olarak tüm genotipler için güçlü bir şekilde yukarı regüle edildiğini rapor etmişlerdir. Bu sonuçlar, Tritikale çeşitlerinin yüksek tuzluluğa toleranslı olmasına rağmen, farklı genotipler arasında tolerans aralıklarının farklı olduğunu göstermiştir. Morfolojik, prolin ve MDA seviyelerine dayanarak, Karma2000 ve Tatlıcak-97 çeşitlerini tuza toleranslı çeşitler olarak bildirmişlerdir. Çalışmalar, kuraklık stresi altında SOD'un en önemli antioksidan enzimlerden biri olduğunu (Thounaojam vd. 2012; Shen vd. 2013; Long vd. 2014) CAT ve APX'in ise ROT detoksifikasyonunda tamamlayıcı roller üstlendiğini göstermektedir (Santos vd., 2004; Sekmen vd., 2007; Cherian ve Reddy 2003; Amor vd., 2005). Bu enzimler, kuraklık stresi altında bitkilerin oksidatif dengesini koruyarak daha iyi bir stres toleransı ve stabil ürün verimi sağlamaktadır.

4.4. Tritikalede Kuraklık Stresi Uygulamasının Metabolit Sentezi Üzerine Etkileri

Tritikale ve diğer serin iklim tahıllarının kuraklık stresine verdiği metabolik tepkiler, yüksek performanslı metabolom profillemeye yoluyla belirlenmiştir (Çizelge 4.7). Kuraklık stresinin çeşitler ve ebeveynleri üzerindeki etkilerinin detaylı incelenmesi için temel bileşen analizi (Şekil 4.18), detaylı ısı haritaları (Şekil 4.19) ve her bir

metabolitin kuraklık stresi ile mücadelesinde çeşit üzerindeki etkisi temel bileşen analizi (PCA) yük değerleri ısı grafikleri (şekil 4.20) yardımıyla değerlendirilmiştir. Bulgular, kuraklık stresine maruz kalan tritikale çeşitlerinin metabolik profillerinde önemli farklılıklar bulunduğunu ve bu farklılıkların özellikle belirli metabolitlerin birikimi ile ilişkili olduğunu göstermiştir.



Çizelge 4.6. Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin yüksek performanslı metabolom profillemeye ile karşılaştırmaları

Metabolit	Alperbey control	Alperbey %24 PEG	Karma 2000 control	Karma 2000 %24 PEG	Mikham 2002 control	Mikham 2002 %24 PEG	Presto control	Presto %24 PEG
Arginine	2345,70±268,18 ^a	1414,03±491,64 ^a	3541,77±2489,98 ^a	1022,40±209,87 ^a	823,24±253,21 ^a	1497,75±201,91 ^a	1719,23±503,16 ^a	2110,14±20,35 ^a
Asparagine	379429,80±148611,38 ^a	694945,55±417559,14 ^a	701903,01±41010,02 ^a	712433,32±78012,91 ^a	531402,76±128349,26 ^a	776788,54±75695,11 ^a	689268,24±74640,54 ^a	246354,83±3192,86 ^a
Aspartic acid	183476954,43±13992085,43 ^{abc}	164700752,07±10626167,02 ^{abc}	175458503,00±19250266,16 ^{abc}	153317636,47±13881887,28 ^{bc}	150304044,03±147001,62 ^a	189963566,33±11656912,73 ^{ab}	153932638,57±8629604,99 ^{bc}	4880538,57±843096,59 ^a
Citric acid	31897514,12±3281119,17 ^a	29108577,02±6616651,65 ^{bc}	27975741,41±558410,39 ^{bc}	19721418,40±3491646,24 ^{abc}	20280852,47±3560763,73 ^{abc}	24619906,30±2586563,73 ^{bc}	22496814,01±3382291,81 ^{abc}	4489697,24±1714113,25 ^a
D-Glutamic acid	143820114,99±26892690,65 ^{bc}	157477845,57±18769179,19 ^{abc}	146148456,62±47630079,43 ^{bc}	98394098,80±24376625,87 ^b	87035628,29±33601622,13 ^a	103388884,13±18172881,44 ^b	99493227,49±22463026,82 ^a	2444355,15±910993,77 ^a
D-Phenylalanine	4962407,33±607025,07 ^a	4505595,32±585114,44 ^a	5314193,37±958750,44 ^a	4221921,37±87341,02 ^a	3401254,29±698011,37 ^a	4495700,03±369056,18 ^a	4082611,88±589489,48 ^a	2105,60±786,52 ^a
DL-Tryptophan	130696,30±52518,68 ^a	133740,25±81454,90 ^a	344670,51±102118,32 ^a	149682,02±1459,51 ^a	42877,11±25831,91 ^a	160031,84±17515,04 ^a	129737,69±48983,86 ^a	3358670,28±1388935,47 ^a
Fructose	85449931,10±10837645,85 ^a	67228229,68±11199421,13 ^a	93198749,84±22933009,09 ^a	53365892,47±7202655,54 ^a	53924420,95±699960,25 ^a	62580231,67±8074286,15 ^a	74356101,82±13789910,28 ^a	41481850,25±5856496,85 ^a
Fumaric acid	174245,77±35185,18 ^a	168845,14±65137,99 ^a	138993,19±89272,95 ^a	51401,21±12878,70 ^a	49672,66±1210,88 ^a	85193,97±22856,65 ^a	104069,42±40917,07 ^a	174961,91±70443,33 ^a
Galactinol	5108200,50±513810,78 ^b	6882184,13±609420,86 ^{ab}	7129043,25±493443,36 ^{ab}	7736636,50±1394094,19 ^{ab}	6045675,46±1039386,86 ^{bc}	7968607,67±706740,85 ^a	7944232,01±1012085,82 ^a	6963150,93±50268,19 ^{ab}
Galactose	10168800,94±1449369,75 ^a	10213366,47±887850,88 ^a	11316388,78±1932864,25 ^a	7283034,63±1306159,27 ^a	6816863,02±513235,83 ^a	53853123,63±5098712,52 ^b	10105117,21±1790530,24 ^a	10317231,53±624083,07 ^a
Gluconic acid	24794,24±4269,52 ^a	42222,72±16523,03 ^a	43147,11±15882,99 ^a	24634,45±8920,20 ^a	23169,54±17326,84 ^a	31426,60±7494,18 ^a	58003,63±33286,20 ^a	43092,29±16525,13 ^a
Glucose	49311348,72±591360,04 ^c	46313667,24±3386051,66 ^c	50355079,55±8982082,19 ^c	31085274,60±176288,32 ^{abc}	29153812,99±2769079,30 ^{abc}	38881550,44±3868931,71 ^{bc}	42552899,74±8466226,58 ^a	46798740,94±1937977,86 ^a
Glutamic acid	10371526,03±2105999,84 ^a	5407965,41±2354036,98 ^a	6299985,36±1483544,77 ^a	4723941,64±1031837,46 ^a	5655867,28±182284,95 ^a	11343153,23±779064,52 ^a	3890548,72±683976,99 ^a	5661402,34±2665955,76 ^a
Glutamine	44439252,45±13505509,92 ^a	45256582,22±7644068,08 ^a	45138061,34±12255846,40 ^a	29878376,18±6232563,34 ^a	29470389,15±10310922,70 ^a	34933885,66±4731270,75 ^a	33215372,67±7297198,29 ^a	46511551,58±9628655,36 ^a
Glycine	17701140,50±2185485,80 ^{bc}	14036478,22±1005878,35 ^c	12815846,19±33383,68 ^c	12382164,65±460322,17 ^{bc}	10635930,50±1925888,71 ^{bc}	12330854,16±2228464,52 ^{bc}	10338990,97±881053,49 ^{bc}	14234918,08±96411,96 ^{bc}
Inositol, myo-	8842436,32±338299,70 ^{abc}	8586133,16±1253035,97 ^{abc}	10351451,85±2634819,58 ^{abc}	9569943,88±1678874,40 ^{abc}	7443968,88±981501,91 ^{abc}	8040761,97±610778,94 ^{abc}	7441717,92±574736,77 ^{abc}	8699705,73±1199918,77 ^{abc}
L(-)-Malic acid	45692697,17±1941397,36 ^a	49250128,88±9296781,88 ^a	47239396,52±10908668,29 ^a	35852164,85±5662814,56 ^a	33952782,33±5885074,47 ^a	41954638,43±3053566,30 ^a	41348614,65±4569832,17 ^a	49989406,55±9199230,65 ^a
L-Alanine	28028183,12±2404414,10 ^a	29447716,68±3672106,78 ^a	17275238,97±424241,49 ^a	16666821,08±3244541,80 ^a	12799419,44±2747210,68 ^a	17207944,06±5052363,16 ^a	16394258,82±842457,05 ^a	29863432,99±3575855,98 ^a
L-Asparagine	652091,52±89386,25 ^a	1246483,63±225975,44 ^a	1414983,35±565717,42 ^a	651567,53±192807,61 ^a	382102,38±224870,83 ^a	652389,11±200236,84 ^a	581417,91±209125,39 ^a	1278422,15±265167,41 ^a
L-Isoleucine	2560521,47±1014136,55 ^a	2089363,07±498620,32 ^a	3131951,66±535667,07 ^a	2441224,43±120186,61 ^a	1511463,47±185316,46 ^a	2422261,98±161992,08 ^a	2095877,27±188859,70 ^a	2112470,12±478332,79 ^a
L-Proline	3688923,71±1667276,38 ^a	3168602,59±780880,74 ^a	7723339,60±2196823,28 ^a	5285341,70±342230,00 ^a	2608694,66±239969,87 ^a	5220486,20±225850,16 ^a	4128450,19±769579,66 ^a	3188986,31±732912,03 ^a
L-Threitol	87893,87±32235,10 ^a	41278,83±14380,02 ^a	55605,55±23281,64 ^a	31047,89±5394,42 ^a	33805,19±17447,54 ^a	37718,48±8835,51 ^a	55296,78±26425,85 ^a	42329,40±14815,84 ^a
L-Threonine	7885352,10±778925,35 ^a	8161220,67±886120,65 ^a	8933788,64±1499446,99 ^a	7822541,90±531447,97 ^a	6543561,68±744287,09 ^a	8483105,70±669330,88 ^a	8002534,52±519209,51 ^a	8276232,84±859678,22 ^a
Valine	6192308,79±2082222,67 ^a	6092898,04±902953,46 ^a	7353903,56±1017945,56 ^a	6560465,20±391476,22 ^a	4718434,00±595194,01 ^a	6882761,72±675204,93 ^a	5610352,53±469860,10 ^a	6168256,14±850350,20 ^a
Lactic Acid	2174893,82±87354,39 ^a	2582869,14±425455,55 ^{ab}	2815184,03±541573,22 ^{ab}	2973968,40±297398,53 ^{ab}	2391893,95±554096,52 ^{ab}	2622709,33±260322,11 ^{ab}	2021701,45±231270,20 ^a	2631136,39±450547,57 ^{ab}
Leucine	5700322,58±2586073,06 ^{bc}	3926853,23±885571,77 ^{bc}	8248153,78±1624448,77 ^a	6399532,03±23125,18 ^a	3548240,80±402547,45 ^{bc}	6143620,50±522435,48 ^{bc}	4505512,99±205815,23 ^{bc}	3950837,05±480886,39 ^{bc}
Lysine	581866,64±75594,03 ^a	541239,50±18578,87 ^a	549955,09±121418,31 ^a	362578,30±120976,49 ^a	722508,37±215529,56 ^a	649200,33±121809,73 ^a	464902,95±85628,00 ^a	561679,07±208937,18 ^a
Maltose	2416435,58±376310,54 ^a	2365405,19±298290,01 ^a	3100850,49±468783,17 ^a	2774959,04±161532,47 ^a	4870458,82±2683684,31 ^a	2896238,42±342580,22 ^a	2941172,62±251981,71 ^a	2387513,67±252054,12 ^a
Melibiose	329297,06±21887,61 ^a	375346,10±37891,61 ^a	519169,89±103559,30 ^a	415582,61±61275,49 ^a	334398,67±66492,78 ^a	526033,36±80752,71 ^a	386727,20±54247,08 ^a	381250,06±39547,81 ^a
Methionine	1849476,81±221477,95 ^a	1635591,82±208135,98 ^a	1779544,94±290644,33 ^a	1514674,86±133311,91 ^a	1329703,79±182488,40 ^a	1798782,55±157818,63 ^a	1399754,71±59436,75 ^a	1657098,02±197160,25 ^a
Ornithine	697667,55±41846,12 ^a	798624,26±219698,51 ^a	694747,12±243200,76 ^a	485732,54±83219,77 ^a	776293,08±400104,79 ^a	656197,61±90737,09 ^a	537624,40±100673,87 ^a	810150,88±215735,97 ^a
Phenylalanine	69137,20±64606,61 ^a	28368,34±26347,54 ^a	18387,93±15611,73 ^a	8257,15±5847,97 ^a	2419,77±301,91 ^a	5505,29±255,15 ^a	9682,84±6975,59 ^a	30694,42±28708,25 ^a
Proline	14491,70±9290,66 ^a	27322,27±19538,08 ^a	1274,72±526,06 ^a	54740,58±6798,23 ^a	16693,05±3752,34 ^a	47237,45±22528,05 ^a	55878,31±17033,54 ^a	27100,38±19165,36 ^a
Putrescine	1762256,93±123141,59 ^a	1324759,80±221361,38 ^a	1228365,54±276888,33 ^a	1011859,34±136113,29 ^a	900090,61±155323,27 ^a	1197137,42±158996,35 ^a	970251,80±122704,14 ^a	1341026,09±210203,18 ^a
Pyruvic acid	788701,86±196918,63 ^a	699038,47±123687,14 ^a	626177,58±127533,34 ^a	824130,55±140750,47 ^a	501263,52±60929,97 ^a	828699,09±94147,65 ^a	613996,97±203485,87 ^{ab}	701990,15±104779,20 ^a
Raffinose	6712779,65±1102569,36 ^{bc}	10763787,74±124562,05 ^{bc}	10087212,69±392791,33 ^{bc}	11403802,81±2056690,71 ^{bc}	8597155,20±700243,97 ^{bc}	11681821,63±623223,42 ^{bc}	11952243,45±1960015,17 ^{bc}	10896466,10±1102925,76 ^{bc}
Serine	156213952,73±14301847,53 ^{def}	178768696,57±18294208,64 ^{def}	181511278,73±33161376,68 ^{def}	1366025137,93±4073493,52 ^{def}	136602253,70±14824032,26 ^{def}	176665811,53±19718497,45 ^{def}	161468410,307983858,33 ^{def}	181244808,90±17524161,11 ^{def}
Succinic acid	6254665,29±527779,94 ^a	6537760,94±1281961,14 ^a	6878520,16±832641,58 ^a	5873170,83±673511,18 ^a	5846254,81±1628074,28 ^a	6470120,02±536988,99 ^a	7113533,86±1532724,60 ^a	6678999,17±1382456,71 ^a
Sucrose	457308328,87±17234948,98 ^{bc}	468513946,27±21308607,48 ^{def}	471049017,27±1532325,75 ^{def}	503920512,60±22789209,51 ^a	459222137,13±1726065,20 ^{ab}	502730045,03±26208610,40 ^a	482096814,93±7154561,47 ^{def}	474319379,50±5612153,87 ^{def}
Threonic acid	4402854,64±714164,02 ^a	4352117,75±989271,16 ^a	4432392,19±833286,35 ^a	3795157,74±162086,76 ^a	3795157,74±162086,76 ^a	4038070,12±319505,92 ^a	4273365,74±1535428,06 ^a	4452694,26±1059525,64 ^a
Threonine	427698,84±267784,25 ^a	581469,31±537063,86 ^a	321094,45±185119,92 ^a	196302,11±83620,84 ^a	86243,85±46192,03 ^a	105222,28±19094,83 ^a	386417,66±228134,39 ^a	628952,74±585277,31 ^a
Trehalose	196888,83±42014,53 ^a	295186,67±73098,32 ^a	297717,90±84529,65 ^a	382107,54±54240,45 ^a	203284,02±73406,04 ^a	308952,95±103745,39 ^a	256020,67±76659,90 ^a	295505,48±67317,54 ^a
Tyrosine	153686,26±35277,06 ^a	225731,69±32380,27 ^a	419304,00±153242,27 ^a	233361,51±40360,57 ^a	161356,51±40360,57 ^a	365790,22±31047,12 ^a	249704,98±5698,63 ^a	230801,73±38406,97 ^a
Oxoputaric acid	3787516,10±397763,24 ^a	3434188,85±334463,73 ^a	3687020,69±455636,47 ^a	3406431,33±379531,44 ^a	3071602,73±352802,34 ^a	3807856,76±310418,88 ^a	3216642,93±40842,97 ^a	3716308,88±235191,09 ^a

Çizelge 4.6. Devamı

Metabolit	Tacettinbey control	Tacettinbey %24 PEG	Tatcak 97 control	Tatcak 97 %24 PEG	Trica control	Trica %24 PEG	Buğday control	Buğday %24 PEG	Cavdar control	Cavdar %24 PEG
Arginine	1358821,84 ± 137812,00 ^a	1879272,93±66281,35 ^a	1359662,81±83094,52 ^a	2032223,44±179796,14 ^b	720842,78±25536,35 ^a	935789,52±14623,94 ^a	756726,63±43657,27 ^a	545505,97±29834,83 ^a	90938626,64±8387729,02 ^a	72496952,89±13307324,53 ^b
Asparagine	38538381,65±7913640,84 ^a	57666230,22±7862554,36 ^b	59171079,69±6882619,38 ^a	65264147,59±8939772,52 ^a	290424601,13±5125761,45 ^a	295902332,33±28895689,77 ^a	2303788116,50±14056918,77 ^a	332540362,20±50502572,26 ^a	66572795,57±508567,22 ^b	66690385,27±8351207,38 ^b
Aspartic acid	211947703,13±16554562,90 ^a	223705092,57±6981241,44 ^b	195838722,53±7412778,68 ^{int}	238694625,97±8525644,39 ^a	211383673,83±4305846,84 ^{int}	183994759,80±5955496,35 ^{int}	187459531,30±8765564,99 ^a	288106194,90±4428167,73 ^b	28775753,58±5095042,32 ^a	22426206,20±131046,75 ^a
Citric acid	385986675,87±14048413,16 ^b	335635887,10±9058859,46 ^a	275046270,67±10121184,21 ^c	348202163,67±4012517,01 ^a	100869599,32±2036673,23 ^a	82125505,86±1370707,55 ^a	79306855,34±3422950,43 ^a	67049596,37±2475725,59 ^a	14062263,47±4079748,04 ^b	11266687,30±570322,60 ^a
D-Glutamic acid	261873633,87±20526582,28 ^a	774767796,77±33831974,05 ^c	329026633,37±25951908,67 ^c	487844808,53±7471915,97 ^a	735787289,17±717537,53 ^{int}	735628566,87±11712837,04 ^c	732559709,83±13387957,02 ^{int}	335963906,30±10963167,88 ^c	233152631,07±49045636,08 ^d	202679571,07±1317741,75 ^{int}
D-Phenylalanine	23244421,67±2387405,76 ^a	25650450,89±3581827,75 ^a	32942759,89±2521328,99 ^a	36342904,11±4586707,61 ^a	56167622,45±3247220,65 ^a	59545795,74±3753040,43 ^a	61522416,93±479198,76 ^a	60704770,10±4595151,24 ^a	5352124,81±1569840,36 ^a	8356307,62±435167,98 ^a
DL-Tryptophan	8481376,99±1231130,73 ^a	12156095,58±977980,51 ^a	12332247,80±1280596,56 ^a	14912927,60±1317422,21 ^a	2491777,32±258825,42 ^a	3169034,19±307160,96 ^a	3155884,89±616491,17 ^a	5990670,61±596177,06 ^a	54617283,49±2958761,46 ^a	36209740,86±23612437,16 ^b
Fructose	1508047887,33±60941734,20 ^a	1649110001,67±34309404,57 ^a	1812807491,67±30800516,02 ^a	2757390932,33±37423541,56 ^a	698056302,13±24909286,19 ^a	1442082015,33±33096561,89 ^a	1268180431,00±39271910,84 ^a	917519863,23±19738818,97 ^a	222702454,33±17407160,56 ^a	191210167,83±49171158,47 ^a
Fumaric acid	9801802,28±835043,15 ^a	16266945,26±837253,16 ^a	11404961,87±271168,36 ^a	13996904,61±357230,84 ^a	4605563,24±380144,64 ^a	8457634,21±143150,26 ^a	4476766,00±134961,46 ^a	5466830,54±243411,37 ^a	1776259,55±570357,93 ^a	1821986,78±562820,25 ^a
Galactinol	1871369,53±282109,64 ^a	1740527,35±135875,01 ^a	2260835,25±246256,76 ^a	1542361,28±149441,75 ^a	881287,74±118910,72 ^a	563472,51±61438,20 ^a	626995,88±91480,03 ^a	477887,85±61542,37 ^a	689171,14±418408,42 ^a	375343,65±27077,15 ^a
Galactose	577288314,03±25195775,44 ^a	543371284,27±12091158,53 ^a	567225837,70±7858218,93 ^a	1039658272,33±14249324,62 ^a	324672660,47±9292814,73 ^a	421170766,83±10152222,87 ^a	459286958,57±14857393,75 ^a	336086708,03±7654670,05 ^a	3469817,39±1492431,91 ^a	1590524,72±695927,55 ^a
Gluconic acid	1032474,31±181786,65 ^a	1809745,79±100793,61 ^{int}	1279089,53±134726,49 ^a	683621,35±78692,49 ^a	1102627,13±132131,34 ^a	2085655,11±129340,82 ^a	2060453,68±163785,64 ^a	1633823,06±117166,64 ^a	581812,60±149375,02 ^a	626365,95±154921,67 ^a
Glucose	365860606,77±15424731,73 ^a	360733380,47±7216764,09 ^a	373655346,80±7507673,70 ^a	683770565,43±6940823,39 ^a	213860997,00±4918317,33 ^a	274532457,87±6188637,88 ^a	296754313,73±9906991,26 ^a	227032946,13±5658740,21 ^a	13740303,93±2841808,84 ^a	18879601,60±125623,31 ^a
Glutamic acid	4317604,45±246553,82 ^a	17065517,03±353705,79 ^a	15235062,83±3486858,37 ^a	21491852,65±1799615,88 ^a	23865220,47±3074141,50 ^a	18640600,16±1171953,13 ^a	22034183,97±1772257,04 ^a	28853557,10±2552567,25 ^a	236783270,40±50749290,73 ^a	180466249,33±34063030,81 ^b
Glutamine	170281305,73±509441,43 ^a	149417180,70±14196693,76 ^a	150645404,13±91165117,21 ^a	337465040,20±90088447,89 ^b	152942905,00±72835382,10 ^{int}	1439534194,33±54784226,32 ^a	1657769482,00±79818670,94 ^a	1979432292,67±11344454,83 ^a	134458806,93±18187477,33 ^a	142699973,57±15952711,74 ^a
Glycine	38718914,07±344548,75 ^a	38874821,06±3412121,34 ^{int}	42553802,32±3192115,41 ^a	101851686,20±4490256,32 ^a	18925279,50±1869726,94 ^a	27378462,19±2062364,28 ^a	26808070,96±1676933,60 ^a	33226604,48±1574515,69 ^a	3668844,12±1466344,46 ^a	3361866,91±353844,78 ^a
Inositol, myo-	10269878,12±1174228,70 ^{int}	13968128,79±1006794,65 ^a	13384998,78±1170711,97 ^a	48116220,47±3147970,37 ^a	5200786,37±329878,83 ^a	8994813,82±1089019,91 ^a	20537264,61±1299827,25 ^a	12062150,76±815578,47 ^{int}	5630104,69±1857118,77 ^{int}	4527407,87±260385,64 ^a
L-(+)-Malic acid	298282631,80±26862076,44 ^a	299882950,50±62272127,60 ^a	319158098,73±5728036,57 ^a	374423420,27±48762727,91 ^a	95567758,08±2988168,89 ^b	63271893,69±3372795,08 ^a	127369429,17±8039820,07 ^a	99892731,57±477990,78 ^a	1187682379,00±36654587,02 ^a	932853686,23±33521237,22 ^a
L-Alanine	108923587,39±11947257,22 ^a	86794065,63±5493233,84 ^a	105474530,43±11849243,40 ^a	909614696,23±2586826,27 ^a	70736744,21±9272227,13 ^a	81498107,49±6538004,95 ^a	65252315,47±6164554,73 ^a	104816432,39±6326193,91 ^a	1658917272,97±562306620,04 ^a	1059866056,83±54511638,09 ^a
L-Asparagine	18413811,31±740726292,78 ^a	203479299,13±30543471,36 ^a	184516307,33±3027807,67 ^a	236396219,77±23049844,42 ^a	1234680439,67±108026314,32 ^a	1377154487,00±127957546,30 ^a	1526300726,33±91650099,38 ^a	1783729511,33±49979327,85 ^a	23129579,18±2471181,22 ^a	22422752,58±1299198,13 ^a
L-Isoleucine	94134643,07±11464249,88 ^a	107047633,54±7214657,79 ^a	121702764,37±6696477,31 ^a	125713735,03±8293194,74 ^a	31201173,26±42132131,34 ^a	33791731,41±2477690,46 ^a	36490919,54±2120746,03 ^a	8572698,95±816310,00 ^a	44281762,78±2336061,60 ^a	10799622,43±2144933,87 ^a
L-Proline	26207237,25±2972706,69 ^a	20653383,76±1486565,12 ^a	26103628,10±1673183,95 ^a	60623298,45±5633650,95 ^a	11028127,35±1207392,06 ^a	11728052,21±499736,70 ^a	21079807,27±1923675,13 ^a	66771600,80±5505526,64 ^a	414787969,93±160288126,42 ^a	246666870,10±15195294,68 ^a
L-Threitol	146997,18±146822,92 ^a	317026,77±13265,55 ^a	263305,81±10815,56 ^a	486545,69±198125,87 ^a	491470,41±32378,91 ^a	653600,16±53424,24 ^a	722840,85±22824,51 ^a	697711,04±27705,89 ^a	57041926,35±23520945,99 ^a	31843003,99±3038542,78 ^a
L-Threonine	18657291,31±2072314,37 ^{int}	34952089,51±18826,76 ^a	23274865,22±412268,74 ^a	29627251,19±698754,76 ^a	9757447,19±698754,76 ^a	15629688,82±329768,75 ^a	15505366,39±813788,06 ^a	12281277,51±711254,12 ^a	21146990,60±5436525,57 ^a	20554992,98±3274017,69 ^a
Valine	78531476,17±13180899,89 ^a	86055932,37±3846023,60 ^a	78775793,62±5311153,92 ^a	165516869,10±1034609,34 ^a	92825801,23±10278519,55 ^a	97342155,80±5088267,33 ^a	67036135,18±1409221,43 ^a	106684297,32±5090356,94 ^a	26072890,16±11980619,11 ^a	11915249,63±1997961,17 ^a
Lactic Acid	2607945,48±2819877,03 ^a	6266468,41±212676,16 ^a	11634829,41±742691,37 ^{int}	72055885,21±4325005,16 ^a	36883837,99±3688939,00 ^a	8880553,65±380767,63 ^b	18591855,09±9311741,06 ^a	3171412,59±85396,62 ^b	7802264,62±2497637,21 ^b	6182546,16±908814,79 ^b
Leucine	62494640,78±4817599,85 ^a	80497154,22±1926435,56 ^a	60488061,73±1023018,49 ^b	24472840,90±530346,45 ^a	19021030,90±116747,68 ^a	21298190,64±475752,46 ^a	21298190,64±475752,46 ^a	27048219,75±805128,60 ^a	525615,64±227898,52 ^a	245015,02±2736,81 ^a
Lysine	0 ^a	40425,50±40425,50 ^a	74721,96±38243,62 ^a	235771,23±11806,40 ^a	1653,11±1653,11 ^a	4432,79±620,42 ^a	21281,22±1113,31 ^a	2358,75±1179,38 ^a	39685769,08±10922735,99 ^a	47624205,90±2594863,75 ^a
Maltose	1589454,37±256751,70 ^a	1626857,92±130264,98 ^a	1482378,22±189417,83 ^a	4918237,31±505568,47 ^a	1021756,89±145234,26 ^a	1119738,97±130704,66 ^a	1026695,69±153217,03 ^a	868115,72±12380,57 ^a	299601364,66±117532967,61 ^a	173535387,97±9808118,77 ^a
Melibiose	622502,18±148222,42 ^a	592319,70±97490,73 ^a	685384,80±128720,67 ^a	1553353,21±134763,55 ^a	726346,30±118751,25 ^a	709995,48±78593,74 ^a	580240,53±116602,22 ^a	443043,42±78540,14 ^a	682304261,32±28829295,03 ^a	419620159,00±29623669,53 ^b
Methionine	13500907,10±946291,83 ^a	16003713,41±403676,34 ^a	15780672,36±371178,87 ^a	23224064,63±466069,82 ^a	8152293,74±67782,56 ^a	12471142,06±209212,29 ^a	11674932,33±969432,22 ^a	12535406,95±582133,24 ^a	449571604,03±38517127,96 ^a	409858425,63±49646506,40 ^b
Ornithine	10575053,50±517160,90 ^a	10387782,01±276901,85 ^a	8489396,03±393969,06 ^a	11569556,13±444561,30 ^a	14136976,24±818901,45 ^a	18531361,59±556063,44 ^a	16182083,29±831320,57 ^a	10885132,28±727821,43 ^a	2246915,67±378118,86 ^a	1642037,51±413334,63 ^a
Phenylalanine	528621,90±53957,28 ^a	557503,60±106567,95 ^a	396113,52±105968,28 ^a	101411,92±14816,01 ^a	1837770,00±52253,47 ^a	93903,82±7510,86 ^a	86371,45±2955,20 ^a	126744,35±29767,18 ^a	15861614,74±2181142,92 ^b	26659623,94±5108156,98 ^a
Proline	687185,70±280565,96 ^a	1019570,70±220957,81 ^a	697621,55±116766,03 ^a	1289445,93±214474,60 ^a	3716019,96±406942,39 ^a	3414690,96±435368,20 ^a	1629765,52±70339,21 ^a	4767173,18±781718,12 ^a	3052927,05±1625234,15 ^a	1297185,56±467951,45 ^a
Putrescine	5530062,92±532038,14 ^a	4870389,63±329878,38 ^a	4161799,33±390602,59 ^a	56670428,06±1662960,94 ^a	15648645,36±677542,87 ^a	76499986,98±4209953,74 ^a	49147413,96±3411122,81 ^a	35375282,06±2727197,14 ^a	23673990,68±135422,34 ^a	20354394,63±477373,77 ^a
Pyruvic acid	1735567,74±286417,03 ^a	1634596,81±73136,04 ^a	1645839,86±115854,58 ^a	8072772,83±495539,61 ^a	989739,49±125000,17 ^a	1094943,29±58444,75 ^a	356944,93±33526,67 ^a	784681,27±40724,58 ^a	1712469,58±93984,29 ^a	1808084,27±180054,19 ^a
Raffinose	119201942,50±11880013,82 ^a	85316426,16±5122332,07 ^a	117688614,70±9943330,24 ^a	215465068,77±4677251,09 ^a	15658819,44±2376832,95 ^a	40423099,52±4035451,33 ^a	51058653,55±5883208,57 ^a	23613263,21±2340601,67 ^a	1271212,10±12175,04 ^a	98855,81±6518,91 ^a
Serine	100865817,20±12169189,99 ^b									

Yapılan bu tez çalışmasında tritikale çeşitlerinin kuraklık stresine yanıt olarak farklı metabolik değişimleri gözlenmiştir. Kuraklık stresi ile ilişkili 45 metabolit saptanmış olup bunlardan Fruktoz, G glutamin, L- Asparajin, L-(-)-Malik asit, L- Alanin, Serine, Aspartik asit, D-Glutamik asit, Galaktoz, sitric asit, Glukoz, Asparjin , L-Proline, Glutamik asit, Maltoz, Meliboze ve Metiyonin kuraklık stresi ile en fazla ilişkisi olan metabolitler olarak saptanmıştır.

2-oksoglutarik asit, TCA döngüsünde enerji üretimi sağlayarak hücre enerji metabolizmasını desteklemektedir (Gai vd., 2023). Tatlıcak-97 kontrol grubuna oranla kuraklık stresi altında 2-oksoglutarik asit içeriğini %123 artırmıştır. Bu oran Alperbey'de %10 azalmıştır. Ebeveynleri olan buğday kontrol grubuna kıyasla %76 artarken çavdar ise %78 azalmıştır.

Argininin, osmoprotektör etkisi bulunmaktadır ve poliaminlerin (Putrescine) sentezine katılmaktadır (Hasanuzzaman vd., 2018; Hussein vd., 2022). Arginin sentezi, Karma-2000'de kuraklık stresi altında kontrol grubuna oranla %246 azalırken, Mikham-2002'de %82 artmıştır.

Asparagin, Azot taşınmasında görevlidir ve stres altında protein yıkımı ile elde edilmektedir (Curtis vd., 2018). Alperbey'de kuraklık stresi altında asparagin miktarı kontrol grubuna kıyasla %83 artarken Presto'da %246 azalmıştır.

Aspartik asit, azot metabolizmasında görev alarak, prolin sentezine katkı sağlamaktadır (Lei vd., 2022). Presto çeşidinde kuraklığa direnç mekanizması kontrol grubuna göre aspartik asit miktarının %3354 azalırken bu oran Tatlıcak-97'de %22 arttığı belirlenmiştir.

Sitrik asit, hücresel pH düzenlenmesi ve enerji metabolizmasında etkilidir (Tahjib-Ul-Arif vd., 2021). Presto kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %409 kat azalmış, Tatlıcak-97'de ise %27 kat artmıştır.

D-Glutamik asit, osmotik stres altında serbest amino asit olarak biriktirmektedir (Liu vd., 2024). Presto çeşidinde kuraklık stresi altında D-Glutamik asit yoğunluğu kontrol grubuna göre %397 azalmıştır. Tatlıcak-97 ise kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %48 artmıştır.

D-Fenilalanin, stres yanıtı için sekonder metabolit sentezinde görev almaktadır (Dangi vd., 2018). Yine Presto çeşidinde kuraklık stresi D-Fenilalanin miktarını kontrol grubuna göre ~%200.000 azaltmıştır.

DL-Triptofan, bitkilerde stres hormonlarının (indol-3-asetik asit) sentezine katkı sağlarken bitki büyümesi ve farklılaşmasını düzenleyerek besin ve su elde etme

yeteneğini iyileştirerek çeşitli biyokimyasal süreçleri desteklemektedir (Sadak ve Ramadan, 2021). Karma-2000’de kuraklık stresi altında triptofan aminoasidi miktarı kontrol grubuna kıyasla %130 azalırken, Presto’da %248 artmıştır.

Fruktoz, hücrede su tutma kapasitesini artırmakta ve enerji kaynağı olarak görev almaktadır (Johnson vd., 2020; Khan vd., 2023). Presto’da stres altında kontrol grubuna kıyasla %79 azalma görülürken, Trica çeşidinde %107 artmıştır.

Fumarik asit, TCA döngüsünde enerji üretimini desteklemektedir (Li vd., 2021). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %170 azalmış, Trica %84 artmıştır.

Galaktinol, osmotik strese karşı koruma sağlar ve trisakkaritlerin sentezinde görev alarak hücre sel su dengesini korumakta ve ROT süpürücüsü olarak işlev görerek bitkileri kuraklık stresinden korumaya destek olmaktadır (Xiao vd., 2023). Alperbey kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %35 artmıştır. Trica kontrol grubuna kıyasla %56 azalmıştır.

Galaktoz, hücre duvarı sentezi ve stres toleransı mekanizmalarında rol oynamaktadır (Wang vd., 2022) ve Karma-2000’de kuraklık stresi altında %690 artmıştır.

Glukonik asit, antioksidan etkisiyle ROT’ini azaltmaktadır (Zhi vd., 2024). Trica’da kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %89 artarken, Tatlıcak-97’de %87 azalmıştır.

Glukoz, hücrede enerji metabolizmasını desteklemekte ve osmotik basıncı düzenlemektedir (Liu vd., 2013). Karma-2000 ‘de glukoz miktarı stres koşulları altında %62 azalmıştır. Buna rağmen Tatlıcak-97’de %83 artmıştır.

Glutamik asit, prolin sentezine öncülük ederek hücre sel su dengesini korumaktadır (Raza vd., 2023). %24 PEG stresi altında Alperbey’de %26 azalma, Tatlıcak-97’de ise %139 artış gözlemlenmiştir. Ebeveynlerden buğdayda %81 azalma, çavdarda ise %92 artış tespit edilmiştir.

Glutamin, azot depolamada görev alırken stres koşullarında protein yıkımıyla artış göstermektedir (Fermin vd., 2005). Karma-2000’de kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %51 azalma, Tatlıcak-97’de ise %124 artış görülmüştür. Buna göre, buğday %19, çavdar ise %6 artış göstermiştir.

Glisin, antioksidan bileşiklerin (glutasyon) sentezinde rol oynamaktadır (He vd., 2011). Kuraklık stresi altında stresi Alperbey’de %26 azalma, Tatlıcak-97’de ise %139 artış kaydedilmiştir. Buğdayda %24 artış, çavdarda ise %9 azalma gözlemlenmiştir.

Myo-inositol, osmotik stres koruması sağlarken hücresel sinyal iletiminde görevlidir (Munnik ve Vermeer, 2010). Karma-2000'de %24 PEG kontrol grubuna kıyasla %8 azalma, Tatlıcak-97'de ise %259 artış saptanmıştır. Buğday %70 artış, çavdar ise %24 azalma göstermiştir.

L-(-)-Malik asit, TCA döngüsünde ve stomaların düzenlenmesinde önemli bir role sahiptir (Qi vd., 2021). Karma-2000 kuraklık stresi altında %32 azalma gösterirken, Mikham-2002'de %24 artış görölmüştür. Buğday %28 artış, çavdar ise %27 azalma göstermiştir.

L-Alanin, hücresel su dengesini ve enerji metabolizmasını desteklemektedir (Fu vd., 2021). Tacettinbey kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %25 azalmış, Tatlıcak-97 ise %762 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %61 artış gösterirken çavdar %57 azalmıştır.

L-Asparajin, azot metabolizmasında, osmotik basınç düzenlemede ve stres toleransında görev almaktadır (Stadler, 2006). Karma-2000 %24 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %117 azalmış, Presto ise %120 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %17 artış, çavdar ise %3 azalma göstermiştir.

L-Isolosin, hücresel zar stabilitesini artırmış ve kuraklık stresine dayanıklılık sağlamaktadır (Li vd., 2021). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %28 azalmış, Mikham-2002 ise %60 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %21, çavdarda ise %28 artış göstermiştir.

L-Prolin, osmoprotektör olarak hücre su dengesini ve protein stabilitesini korumaktadır (Meena vd., 2019). Karma-2000 kuraklık stresi altında ve kontrol grubuna kıyasla %46 azalmış, Tatlıcak-97 ise %132 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %217 artış, çavdar ise %68 azalma göstermiştir.

L-Threitol, osmoprotektör olarak zar stabilitesini ve enerji rezervlerini desteklemektedir (Wong vd., 2020). Alperbey kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %113 azalmış, Tacettinbey ise %116 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %97 artış, çavdar ise %79 azalma göstermiştir.

L-Threonin, protein sentezi, antioksidan üretimi ve osmotik dengeye katkı sağlamaktadır (Sahoo vd., 2021). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %14 azalmış, Tacettinbey ise 1,87 kat artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday 1,26 kat artış, çavdar ise %3 azalma göstermiştir.

Valin, enerji kaynağı, protein yapımı ve oksidatif stres yönetiminde görev almaktadır (Jiang vd., 2018). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla

%12 azalmış, Tatlıcak-97 ise %110 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %59 artış, çavdar ise %119 azalma göstermiştir.

Laktik asit, hücrel metabolizmanın regülasyonunda ve pH düzenlenmesinde görev almaktadır (Yin vd., 2021; Raman vd., 2022). Trica kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %315 azalmış, Tatlıcak-97 ise %519 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %486 artış, çavdar ise %15 azalma göstermiştir.

Lösin, protein stabilitesini desteklemekte ve enerji üretimine katkı sağlamaktadır (Wang vd., 2024). Alperbey kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %45 azalmış, Mikham-2002 ise %73 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %27 artış, çavdar ise %115 azalma göstermiştir.

Lizin, osmotik dengeye katkı sağlarken hücrel metabolizmayı desteklemektedir (Wang vd., 2024). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %52 azalmış, Tatlıcak-97 ise %216 artış göstermiştir.

Maltoz, enerji kaynağı olarak hücrel su tutma kapasitesini artırmaktadır (Xiong ve Ma, 2022). Mikham-2002 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %68 azalmış, Tatlıcak-97 ise %232 artış göstermiştir.

Melibiyoz, enerji deposu, osmotik düzenleme ve membran stabilizasyonunda görev almıştır (Wang vd., 2022). Karma-2000 %24 PEG kontrol grubuna kıyasla %25 azalmış, Tatlıcak-97 ise %127 artış göstermiştir.

Metionin, antioksidan etkili bileşiklerin sentezine katkı sağlamaktadır (Wang vd., 2024). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %17 azalmış, Trica ise %53 artış göstermiştir. Ebeveynlerinden buğday %7 artış, çavdar ise %10 azalma göstermiştir.

Ornitin, prolin ve putressin sentezinde görev alarak kuraklık stresine toleransı artırmaktadır (Mohammadi-Cheraghabadi vd., 2025). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %43 azalmış, Presto ise %51 artış göstermiştir.

Fenilalenin, sekonder metabolit sentezinde (fenolik bileşikler) görev almaktadır (Wang vd., 2024). Tatlıcak-97 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %291 kat azalmış, Presto ise %217 kat artış göstermiştir.

Prolin, önemli bir osmoprotektör olarak kuraklık stresinde birikir ve hücreyi korumaktadır (Raza vd., 2023; Wang vd., 2024). Presto kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %106 azalırken Karma-2000 ise %3290 artış göstermiştir.

Putresin, hücre büyümesini destekler, oksidatif stres altında zar stabilitesini artırmaktadır (Talaat vd., 2005). Alperbey kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %33 azalırken Tatlıcak-97 ise %1260 artmıştır.

Pürivik asit, Enerji metabolizmasını destekler, glukoneogeneze görev alır (Khosravi-nejad vd., 2022). Alperbey %24 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %13 azalmış, Tatlıcak-97 ise %390 artmıştır.

Rafinoz, Osmotik koruma sağlar, hücrede su dengesini korumaktadır (Liu vd., 2023). Tacettinbey kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %40 azalmış, Trica %158 artmıştır.

Serin, protein sentezine ve antioksidan mekanizmalara katkıda bulunmaktadır (Wang vd., 2024). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %12 azalmış, Trica %117 artmıştır.

Süksinik asit, enerji metabolizmasında yer alırken, stres koşullarında artmaktadır (Yakunina ve Sinitsyna, 2023). Tacettinbey kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %33 azalmış, Tatlıcak-97 ise %77 kat artmıştır.

Sükroz, osmotik düzenleme sağlamakta ve enerji metabolizmasında kullanılmaktadır (Ho vd., 2001). Tacettinbey kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %3 azalmış, Tatlıcak-97 ise %33 artmıştır.

Treonik asit, ROT süpürücü ve hücre zarının stabilitesinde görev almaktadır (Chaturvedi vd., 2024). Trica kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %8 artmış, Tatlıcak-97 ise %73 azalmıştır.

Treonin, protein sentezi ve osmotik stres toleransında görev almaktadır (Sahoo vd., 2021). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %64 azalmıştır. Presto ise %63 artmıştır.

Trehaloz, hücre stabilitesini korumakta ve su tutma kapasitesini artırmaktadır (MacIntyre vd., 2022). Tatlıcak-97 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %131 artış gösterirken en az artışı Presto %15 olarak göstermiştir.

Tirozin, fenolik bileşiklerin sentezine katkıda bulunurken stres yanıtını desteklemektedir (Wang vd., 2024). Karma-2000 kuraklık stresi altında kontrol grubuna kıyasla %80 azalmıştır. Trica %216 artmıştır.

Kuraklık stresi altında çözünür şekerler, organik asitler, fenolikler, amino asitler, yağ asitleri, nükleotidler, peptitler gibi bitki savunma sisteminde hayati öneme sahip metabolomiklerin miktarlarında değişim meydana geldiği gözlenmektedir. Özellikle şekerler ve amino asitlerin düzeylerindeki değişimler, kuraklık toleransı mekanizmalarını

anlamada kritik bilgiler sunmaktadır. Karma-2000, Alperbey ve Mikham-2002 kuraklık stresine daha dayanıklı olduğu, Tatlıcak-97 ve Trica ise hassas olduğunu göstermektedir. Bu bilgiler, tarımsal verimliliği artırmak için daha toleranslı çeşitlerin seçimi ve hassas çeşitlerin iyileştirilmesi için yol gösterici niteliktedir. Bu sebeple bitkilerin kuraklık koşullarına nasıl uyum sağladığını daha iyi anlamak için metabolitlerin oluşturduğu bu koruyucu mekanizmaların tam olarak açıklanması gerekmektedir.

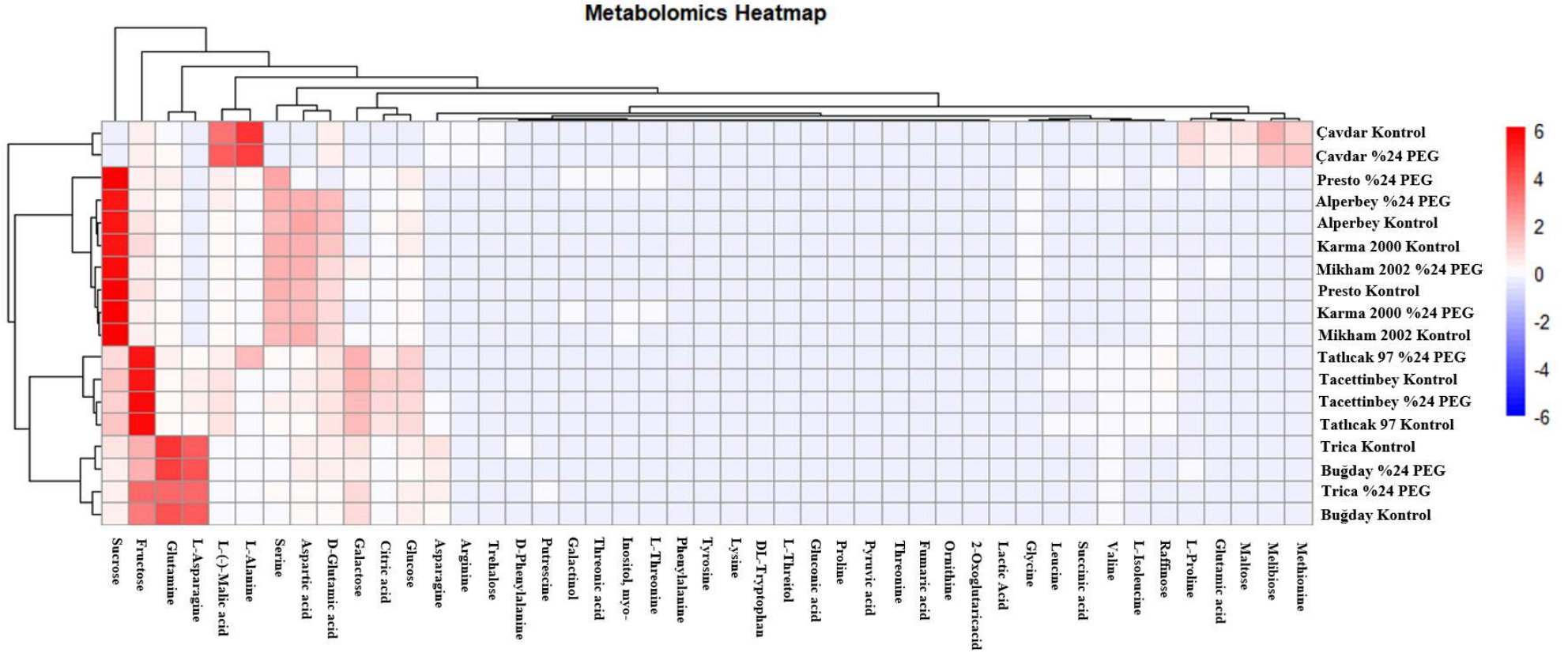




Şekil 4.-18. Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin yüksek performanslı metabolom profilinin PCA (Temel Bileşenler Analizi) grafiği

Kuraklık stresi, bitkilerde su kaybına bağı olarak mekanik, metabolik ve oksidatif değişikliklere yol açmak suretiyle büyüme ve gelişme prosesleri üzerinde ciddi hasara sebep olmaktadır (Farooq vd., 2009; Chaves vd., 2009). Mekanik etkiler, hücredeki turgor basıncının azalmasıyla membran yapısında meydana gelen değişiklikler sonucunda fotosentetik karbon metabolizmasında olumsuzluklar ile bitki bünyesinde ortaya çıkmaktadır (Sharp ve Davies, 1989). Yapılan çalışmada, kontrol koşulları altında yetiştirilen ve kuraklık stresine maruz bırakılan 7 farklı çeşidin kuraklık stresine olan tepkileri tek bileşen analizi (PCA: Principle Component Analysis) ile değerlendirilmiştir. PCA, örnekler arasındaki varyasyonu iki ana bileşen üzerinde özetleyerek, kuraklık stresinin etkilerini ve bu etkilere karşı verilen tepkilerin genel yapısını ortaya koymuştur. Grafikteki temel bileşenler (PC1 ve PC2), örnekler arasındaki varyasyonu açıklayan iki ana eksen temsil etmektedir. "Kontrol" (pembe) ve "Kuraklık" (yeşil) grupları belirli bölgelerde gruplanmış ve kontrol ve kuraklık stresine maruz kalan örneklerin büyük çoğunluğunun birbirine yakın kümelandiğı, ancak bazı örneklerde belirgin bir ayrışma olduğı gözlemlenmiştir. Kontrol grubundaki örnekler genellikle daha homojen bir dağılım sergilemiştir, bu da normal koşullarda türlerin benzer metabolik ve fizyolojik profillere sahip olduğunu göstermektedir. Ancak kuraklık grubu içerisinde örnekler arasında daha fazla varyasyon olduğı gözlenmiştir. Bu durum, kuraklık stresine karşı verilen tepkilerin çeşitler arasında büyük ölçüde değişiklik gösterdiğini işaret etmektedir. Çavdar ve Tatlıcak-97 gibi örnekler gruplar içinde diğerlerinden farklı bir pozisyonda yer alarak, kuraklık stresine farklı tepkiler göstermişlerdir. PC1 (x-ekseni) ve PC2 (y-ekseni), örneklerin çoğunluğunu ayırmada etkili olmuştur. Grafikteki dağılıma göre, çeşitler arasında hem benzerlikler hem de farklılıklar bulunmaktadır. Buğday, Trica, ve Tatlıcak-97 gibi örnekler hem kontrol hem de kuraklık gruplarında birbirine yakın konumlanmış, bu da bu örneklerin kuraklık stresine benzer tepkiler verdiğini göstermiştir. Karma-2000 ve Alperbey, iki grup arasında çok yakın, düşük stres farklılığı göstermişlerdir. Bu çeşitlerin, su kaybını önleyen mekanizmalar (örneğin, stomaların kapanması), yüksek osmoprotektan üretimi (prolin, şekerler vb.), ya da daha verimli su kullanım stratejilerini geliştirdikleri fizyolojik ve biyokimyasal analizler sonucunda da ortaya konulmuştur. Özellikle prolin, aspartik asit ve malik asit gibi metabolitler, kuraklık stresine adaptasyonda kritik rol oynayan bileşenlerdir (Szabados ve Saviouré, 2010; Dubey vd., 2020). Prolin, osmoregülatör görevi görerek hücrel stres toleransını artırırken, sitrik asit ve malik asit gibi organik asitler enerji metabolizmasını destekleyerek adaptasyonu kolaylaştırır (Liu vd., 2018, Fischer ve Byerlee, 2021). Bununla birlikte, karbon

metabolizmasının düzenlenmesi, özellikle sukroz ve fruktoz gibi şekerlerin düşük seviyeleri, enerji yönetiminin stres koşullarında farklı şekillerde sağlandığını ortaya koymaktadır (Liu vd., 2018). Yine, Tatlıcak97 kuraklık stresinden etkilenmiş olan hassas genotip olarak gözlenmektedir. Karma-2000, Presto, ve Alperbey hem kontrol hem de kuraklık gruplarında yakın konumda bulunduğundan, bu üç çeşidin kuraklık stresine karşı geliştirdikleri toleransları da benzerlik göstermektedir. Buna karşın Tatlıcak-97 ise kuraklık stresine belirgin bir duyarlılık göstermektedir. Trica ve Buğday hem kontrol hem de kuraklık gruplarında birbirine yakın pozisyonlardadır, bu da Trica'nın kuraklık stres tepkisinin buğdaya benzerlik gösterdiğini düşündürmektedir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular, tritikale çeşitlerinin kuraklık stresine karşı dayanıklılığını artırmak için amino asit metabolizması, TCA döngüsü ve karbon metabolizması gibi temel yolların önemini ortaya koymuş olup, mevcut literatürdeki bulgular ile uyumlu bulunmuştur (Chaves vd., 2009; Farooq vd., 2009).

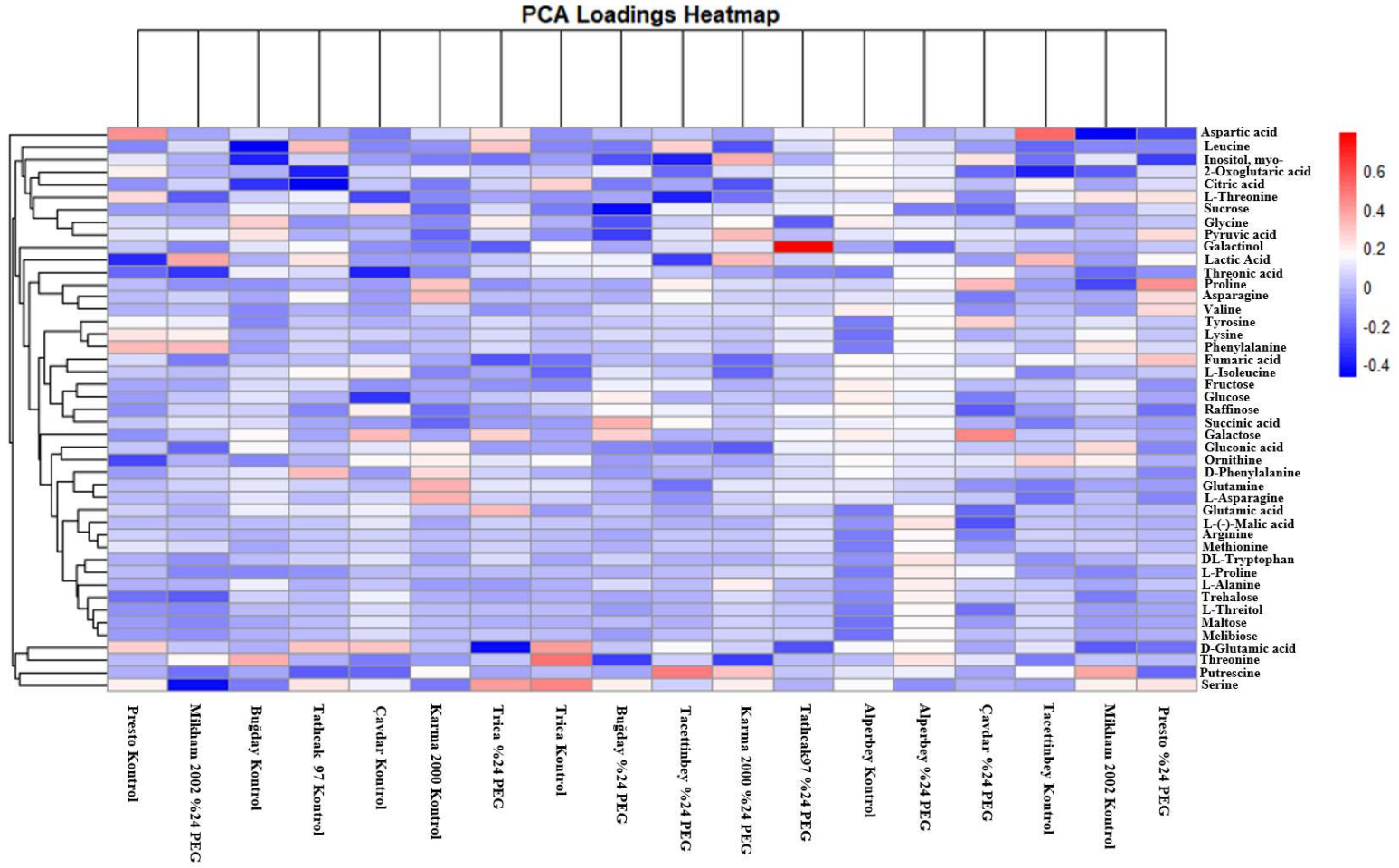


Şekil 4.-19. Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin yüksek performanslı metabolit profilinin ısı grafiği

Metabolit ısı haritası, farklı çeşitlerin kontrol ve kuraklık stresi koşullarındaki metabolit seviyelerini karşılaştırmaktadır (Şekil 4.19). Dikey eksen kontrol grupları ve %24 PEG-6000 ayrı olarak listelenmiş şekilde deney grupları yer almaktadır. Yatay eksen ise ölçülen metabolit türlerini göstermektedir. Bunlar arasında şekerler (ör. sukroz, fruktoz), amino asitler (ör. glutamin, alanin), organik asitler (ör. laktik asit, malik asit) ve diğer metabolitler yer almaktadır. Burada kırmızı tonlar, metabolit seviyelerinin artışı; mavi tonlar, azalışını göstermektedir. Beyaz alanlar ise nötr ya da çok az bir değişim olduğunu göstermektedir. Gruplar, metabolik profillere göre kümelenmiş, bu da belirli çeşitlerin kuraklığa karşı benzer veya farklı yanıtlar geliştirdiğini vurgulamaktadır. Kuraklık stresi altında 45 metabolitin seviyelerinde önemli artış veya azalmalar gözlemlenmiştir. Bu da, kuraklığa karşı tüm çeşitlerin ve ebeveynlerinin savunma mekanizmalarını aktive ettiklerini göstermektedir. Burada kuraklıkla ilişkili 18 metabolit (Sükroz, Fruktoz, Gultamin, L- Asparagine, L-(-)-Malic acid, L- Alanine, Serine, Aspartic acit, D-Glutamik asit, Galaktoz, Citric acid, Glucose, Asparagine, L-Proline, Glutamik asit, Maltose, Melibiose ve Methionine) en fazla ilişkide bulunmuştur. "Sükroz" ve "Fruktoz" belirli çeşitlerde çok yüksek seviyelerde bulunurken, diğerlerinde düşük seviyelerde gözlenmiştir. "Sukroz ve fruktoz gibi bazı metabolitlerin, kuraklık stresi altında belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, kuraklık stresine yanıt olarak bitkilerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak ve osmotik dengenin korunması amacıyla şeker metabolizmasını aktive ettiğini gösterebilir. "L_Methionin" gibi diğer metabolitler daha az değişken görünmekle birlikte, örnekler arasında daha homojen dağılmışlardır. Bunun yanı sıra, yakın metabolitler birlikte değişim göstermektedir. Örneğin, "L_Methionin" gibi aminoasitler, stres altında artış göstermişler ve "L-Alanin", "L_Aspartik Asit", ve diğer amino asitler bir grup oluşturmuşlardır. Buda, bu metabolitlerin amino asit metabolizması veya protein katabolizmasıyla ilişkili olduğunu işaret etmektedir. Bu tip gruplaşma, ortak biyokimyasal yolların veya metabolik ağların işlevsel olduğunu ortaya koymaktadır. Karbonhidrat metabolizması ve amino asit metabolizmasındaki artış, metabolik stres yanıtlarının bir göstergesi olarak gösterilmektedir. Kuraklık stresine maruz bırakılan bitkilerde, şeker metabolizması, amino asit metabolizması veya enerji metabolizmasında stresle ilişkili belirgin değişiklikler gözlenmiştir.

Çavdarın kuraklık stresi altında sukroz, fruktoz ve glutamin gibi kritik metabolitlerin seviyesinde anlamlı bir artış görülmektedir. Bu, çavdarın osmotik dengeyi koruma ve enerji ihtiyacını karşılama mekanizmalarını etkin bir şekilde devreye

soktuğunu göstermektedir. Bu nedenle, çavdar kuraklık stresine dirençli bir çeşit olarak değerlendirilebilir. Ebeveyni olan çavdara benzer özellik gösteren kuraklık stresine dirençli çeşitlerde şekerlerin (ör. sukroz, fruktoz) ve amino asitlerin (ör. glutamin, alanin) seviyesinde artışlar gözlemlenirken, hassas çeşitlerde bu metabolitlerde azalma veya sınırlı değişim olduğu dikkat çekmektedir. Karma-2000’de kuraklık stresi altında, sukroz, fruktoz ve glutamin gibi osmotik düzenleyici metabolitlerde belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu artış, bitkinin kuraklık stresine karşı dayanıklılığını artıran metabolik mekanizmalarını etkin bir şekilde devreye soktuğunu göstermektedir. Karma-2000, enerji ve osmotik düzenleme açısından stres koşullarında oldukça başarılıdır. Alperbey’de kuraklık koşullarında, kritik amino asitlerden biri olan glutamin ve şekerlerden sukrozda artış görülmüştür. Bu, bitkinin stres koşullarında hem protein yıkımını yönetebildiğini hem de karbonhidrat metabolizmasını aktive ederek enerji ihtiyacını karşıladığını göstermektedir. Bu nedenle Alperbey, dirençli bir çeşit olarak değerlendirilebilir. Mikham-2002, şeker ve amino asit metabolitlerinde dengeli artışlar sergilemiştir. Özellikle trehaloz ve sukroz gibi stres toleransında önemli rol oynayan metabolitlerin artışı dikkat çekmektedir. Bu, bitkinin kuraklık koşullarında hücrel yapıyı stabilize edebildiğini ve oksidatif stresi yönetebildiğini işaret etmektedir. Hassas çeşitler, kuraklık stresine maruz kaldıklarında metabolik tepkilerinde dengesizlik veya metabolit seviyelerinde azalma göstermişlerdir. Tatlıcak-97 kuraklık stresi altında metabolit profili bakımından, enerji metabolizmasında önemli rol oynayan sukroz ve glutamin seviyelerinde azalma göstermiştir. Bu durum, bitkinin kuraklık stresi altında enerji üretimini ve osmotik düzenlemeyi yeterince sağlayamadığını göstermektedir. Ayrıca, trehaloz gibi koruyucu şekerlerin seviyesinde anlamlı bir değişim görülmemesi, bu çeşidin strese karşı yeterli bir yanıt geliştiremediğini işaret etmektedir. Trica ‘da stres uygulaması altında, kritik metabolitlerin çoğunda (ör. sukroz, glutamin) azalma veya nötr değişim gözlenmiştir. Bu durum, bitkinin kuraklık stresi sırasında metabolik aktivitelerini artırmakta başarısız olduğunu ve uyum mekanizmalarının zayıf kaldığını göstermektedir. Trica, hassas bir çeşit olabileceğini düşündürmektedir. Tacettinbey’de kuraklık stresi altında, özellikle şeker metabolizmasında dengesizlikler dikkat çekmektedir. Sukroz ve fruktoz gibi karbonhidratlarda anlamlı bir artış gözlenmemesi, kuraklık stresi koşullarında osmotik dengeyi koruma mekanizmalarının yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu durum, Tacettinbey’in hassas bir çeşit olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.20. Saksıda 21 gün yetiştirilen ve kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin yüksek performanslı metabolom profilinin temel bileşen analizi yük değerleri ısı grafiği (PCA Loadings Heatmap)

Şekil 4.20’de, temel bileşen analizi yük değerleri ısı grafiği, her bir metabolitin temel bileşen yük değerlerine etkisi ve çeşitlerin (Alperbey, Karma, Mikham, Presto, Tacettinbey, Tatlıcak, Trica, Buğday, Çavdar) hem kontrol hem de kuraklık stresi koşullarındaki metabolit profillerini incelemek amacıyla oluşturulmuştur. Pozitif yükler (kırmızı tonlar), metabolitin ilgili bileşende belirgin bir katkı sağladığını, negatif yükler (mavi tonlar) ise zıt yönde bir etki gösterdiğini ifade etmektedir. Aspartik asit, prolin, malik asit, ve sitrik asit, özellikle kuraklık stresine bağlı olarak pozitif yük değerlerini göstermektedir ve bu metabolitler kuraklık stresine adaptasyonda kritik bir rol oynamaktadır. Alperbey çeşidinin kuraklık grubunda, aspartik asit ve prolin gibi metabolitlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu, Alperbey’in kuraklık stresine adaptasyonda aminoasit metabolizmasını kullandığını göstermektedir. Karma-2000 çeşidi, kontrol ve kuraklık koşullarında dengeli bir metabolik profil sergilemektedir. Aspartik asit strese yanıt olarak enerji metabolizmasında önemli bir role sahiptir ve bu nedenle yüksek yükler göstermiştir. Sukrozun düşük yük değerleri, enerji dengesinin kuraklık stresinde farklı yollarla sağlandığını vurgulamaktadır. Mikham-2002 kuraklık grubunda şeker metabolizmasıyla ilişkili metabolitlerde (Sukroz) dikkat çeken bir azalma görülmüştür ki bu da çeşidin kuraklık stresine karşı farklı bir metabolik düzenleme yaptığını göstermektedir. Çavdar, kuraklık grubu, özellikle prolin, malik asit ve aspartik asit gibi metabolitlerde yüksek yükler göstermektedir ve bu, çavdarın kuraklık stresine dayanıklılığı konusunda genetik bir avantaja sahip olabileceğini göstermektedir. Aspartik asit, sitrik asit ve tirozin gibi metabolitlerin Alperbey üzerindeki pozitif katkıları oldukça yüksek bulunmuştur. Bu metabolitler, grupların ayrıştırılmasında kilit rol oynamaktadır. Fruktoz ve sukroz gibi şekerler de negatif yük değerleri ile diğer grupları açıklamada rol oynamışlardır. Karma-2000 prolin, alanin ve asparagin metabolitlerinde belirgin yük değerlerine sahiptir. Kuraklık stresinin bu bileşenler aracılığıyla açıklanıyor olabileceği ile uyumlu bulgular sunmaktadır. Fruktoz ise bazı çeşitlerde negatif yük değerleri ile dikkat çekmektedir. Organik asitlerden olan sitrik asit ve malik asit enerji metabolizmasının ana bileşenleridir ve kuraklık koşullarında artan solunum aktivitesi ile karakterize edilmektedir. Amino asit metabolizması, TCA döngüsü ve karbon metabolizması kuraklık stresine yanıt veren en kritik yollar arasında yer almaktadır. Kuraklığa direnç gösteren bitkilerde artış sağlayan metabolitler, genellikle strese yanıt olarak hücrelerin osmotik düzenini korumaya, reaktif oksijen türlerini (ROT) süpürmeyi, enzimleri stabilize etmeye ve protein yapılarını korumaya yardımcı olmaktadır (Hein vd., 2016). Osmo-protaktanlar olarak görev yapan prolin, glutamin serin ve alanin

Tatlıcak-97 ve Trica çeşitlerinde artış gösterirken Karma-2000 ve Tacettinbey çeşitlerinde azalış sağlamıştır. Antioksidan özellik gösteren maddeler glutamik asit, aspartik asit sitrik asit Tatlıcak-97'de artış sağlarken Presto ve Alperbey'de azalış göstermektedir. Kuraklık stresi altında iki kuraklığa zıt sorgum çeşidini (Samsorg 17 ve Samsorg 40) inceleyen Ogbaga vd., (2016), kuraklığa yanıt olarak Samsorg 17'de Samsorg 40'a kıyasla şekerlerin (fruktoz, selobiyoz, galaktoz ve laktoz) ve şeker alkollerinin (miyoinozitol, ribitol ve ksilitol) önemli ölçüde yukarı düzenlendiğini bildirmişlerdir. Yang vd. (2018), kuraklığa dayanıklı ve kuraklığa duyarlı *Zea mays* saf hatlarını kuraklık uygulamasından 7 ve 14 gün sonra değerlendirdiklerinde, kuraklık stresi altında, sakaroz, fruktoz, galaktinol, rafinoz ve ketoz gibi karbonhidratların azaldığını, TCA döngüsünün sitrat, süksinat, α -ketoglutarat ve fumarat gibi bileşenleri 7 veya 14. günde azalırken, izositrat ve sitratın 7 günde arttığını bildirmişlerdir. Glukoz, fruktoz sükroz maltoz melibiyoz Tatlıcak-97 ve Trica gruplarında artış gösterirken, Karma-2000, Mikham-2002, Presto ve Tacettinbey'de azalma gözlemlenmiştir. Asparajin ve aspartik asit, Alperbey ve Tatlıcak-97 çeşitlerinde artış gösterirken Presto çeşidinde azalma gözlemlenmiştir. Aspartik asit, prolin, malik asit, ve sitrik asit, özellikle kuraklık stresine bağlı olarak pozitif yük değerlerini göstermektedir ve bu metabolitler kuraklık stresine adaptasyonda kritik bir rol oynamaktadırlar. Şekerler, aminoasitler ve GABA gibi birçok temel metabolit, kontrol bitkileriyle karşılaştırıldığında kuraklık stresine maruz kalan buğdayda (*Triticum aestivum*) artmıştır (Maeda ve Dudareva, 2012; Suguiyama vd., 2014). Benzer şekilde, kuraklığa dayanıklı ve kuraklığa duyarlı buğday genotiplerinde kuraklığa yanıt olarak prolin, metiyonin, lizin ve arginin içeriklerinde artışlar meydana gelmiştir (Michaletti vd., 2018). Sanchez vd. (2012), aspartik asit, glutamik asit ve fosforik asidin *Lotus japonicus*'ta kuraklık stresi sırasında azaldığını bildirmişlerdir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde tarım ekosistemi ve bitkisel üretim, iklim değişikliği ile biyotik/abiyotik stresler de dahil olmak üzere çevresel streslere maruz kalmaktadır. Abiyotik stres, sıcaklık, tuzluluk, kuraklık ve aşırı ağır metallerle diğer çevre kirliliği de dahil olmak üzere tarımsal sistemlerde önemli verim ve kalite özellikleri kayıplarına neden olan küresel bir sorundur. Aynı zamanda, iklim değişikliğinin doğrudan ve dolaylı etkileri ürün büyümesi ve çevre üzerinde çeşitli abiyotik streslere neden olmaktadır. Kuraklık, tarımsal sistemlerdeki en büyük zararlı abiyotik streslerden biridir. Kuraklık, su açığı yaratır, bu da nem bulunabilirliğinde kısıtlı ve mahsullerde kısıtlı büyüme ve verime yol açar. FAO'nun 2021 yılındaki, raporuna göre kuraklığın, hayvancılıkta bitkisel üretimin %34'ünü etkileyerek bu sektörün 37 milyar dolar zarar görmesine neden olmuştur. 2050 yılına kadar beklenen 9 milyar nüfusun tahıl talebini karşılamak kuraklık koşulları sebebiyle neredeyse imkânsız hale gelmektedir. Bu nedenle, araştırmacılar bitkisel üretimi desteklemek için, kuraklık stresine adaptasyon gösterebilen bitki türlerini geliştirerek karmaşık özellikleri moleküler düzeyde incelemekte ve bitkilerin stres toleransını veya duyarlılığını anlamaya çalışmaktadırlar. Kuraklık stresi şartlarına uyum sağlamak amacıyla bitkilerin ortamda bulunan suyun etkili kullanabilmesi için çeşitli mekanizmalar geliştirirken, bitki metabolizmasında da biyokimyasal ve morfolojik değişimler meydana gelmektedir. Bitkiler çeşitli abiyotik stres koşulları altında metabolik bozulmalara uğramaktadırlar, hareketsiz yaşam formları nedeniyle, bitkilerin metabolik ağı, homeostaziyi korumak ve stresle mücadele etmek için çevresel uyaranlara yanıt olarak sürekli yeniden yapılandırmalar gerektirir. Bu metabolik özelliklerin kapsamlı analizi, bitki metabolik yanıtlarına ve biyokimyasal düzeyde stres koşullarının zararlı etkilerini azaltmak için uygulanan stratejilere genel bir bakış sağlamaktadır.

Tritikale laboratuvar kültürü hibrit bir türdür ve buğday ile çavdarın melezlenmesi ile oluşturulmuştur. Bu tahıl, diğer bitki türleriyle rekabet edebilen, bitki veriminde tercih edilen agronomik özellikleri yüksek biyopolimerler, enzimler, yüksek mukavemetli lifler ve biyoetanol gibi ürünlerin üretimi için bir biyoplatform potansiyeli sağlamaktadır. Tritikale metabolitleriyle ilişkili genlerin işlevi daha iyi anlaşılacak olursa, kuraklıkla mücadele etmek veya hibrit türler üretmek için yaklaşımlar geliştirilebilir. Böylece kuraklıkla başa çıkma potansiyeli yüksek alternatif yöntemler bulunmuş olur.

Bu tez çalışmasında;

13 tritikale çeşidi ile ebeveynleri olan buğday ve çavdarın kuraklık stresine vermiş oldukları tepki morfo-fizyolojik, biyokimyasal ve metabolomik yöntemler kullanılarak ortaya konulmuştur. Özellikle, kuraklık stresi altında yüksek performanslı metabolomik analiz ilk kez morfo-fizyolojik ve biyokimyasal analizler ile değerlendirilmiş ve 7 tritikale çeşidi ile ebeveynleri olan buğday ve çavdarla karşılaştırılması hakkında literatüre ilk kez kapsamlı bir çalışma olarak katkıda bulunulmuştur.

Tritikale çeşitleri ilk yedi günlük çimlenme ve koleoptil yüzdeliği bakımından değerlendirildiğinde kontrol grubuna kıyasla kuraklık stresi uygulanan çeşitlerde çimlenme ve koleoptil yüzdesi düşmüş olup kuraklık stresinin tohum çimlenmesi ve koleoptil gelişimini olumsuz etkilediği gözlenirken Alperbey ve Mikham-2002 ebeveyni olan çavdara benzer özellik göstererek kuraklık stresinde tohum ve koleoptil çimlenmesi bakımından kuraklığı kontrole kıyasla tolere edebildiğini göstermiştir.

Saksıya aktarılan fidelere kuraklık stresi uygulaması sonrası elde edilen morfo-fizyolojik bulgular sonucunda kontrol gruplarına kıyasla tüm çeşitlerde; koleoptil uzunluğu, radikula sayısı, radikula uzunluğu, taze ağırlığı, bitki boyu, kök uzunluğu, yaprak sayısı, yaprak alanı, gövde çapı azalırken, kök sayısı kontrole kıyasla artmıştır ki bu da bitkinin kuraklık stresinde büyüme ve gelişiminin kısıtlandığı ve tritikalenin bu stresle başa çıkmada kök sayısını arttırarak suya ulaşmak için bir adaptasyon gösterdiğini ortaya koymuştur.

Kuraklık stresi altındaki bitkilerin hücresel düzeydeki tepkilerini ve adaptasyon mekanizmalarını ayrıntılı bir şekilde açığa çıkaran biyokimyasal bulgular, MDA seviyelerindeki artış, hücresel zarların oksidatif hasarını yansıtan lipid peroksidasyonunun bir belirtisi olarak ortaya çıkmıştır. Bu da kuraklık stresi uygulanan tritikale çeşitlerinin kontrol grubuna kıyasla hücre zarlarının hasar gördüğünü göstererek stres sonrası tahribatı göstermektedir. Aynı zamanda, prolin seviyesindeki artış, bitkilerin stresle başa çıkma kapasitesini artıran bir adaptasyon mekanizması olarak önemli bir role sahiptir. CAT, APX ve SOD enzim aktivitelerindeki değişiklikler de, bitkilerin oksidatif stresle mücadele yeteneklerinin değişimini yansıtmıştır. Kuraklık stresine tabi tutulan tritikale fidelerinde kontrol grubuna kıyasla yüksek kat artışları gözlenen prolin, CAT ve APX sonuçları neticesinde ise kuraklığa tolerans ve başa çıkma kabiliyeti gözlenmektedir.

Tritikale çeşitlerinin metabolit profillerinde meydana gelen değişiklikler kuraklık stresi ile ilişkilendirildiğinde, özellikle sukroz, fruktoz, glutamin, L- asparajin, L-(-)-

Malik asit, L- Alanin, Serine, Aspartik asit, D-Glutamik asit, Galaktoz, sitrik asit, Glukoz, Asparjin, L-Prolin, Glutamik asit, Maltoz, Melibiyoz ve Metiyonin düzeylerindeki değişimler, kuraklık toleransı mekanizmalarını anlamada kritik bilgiler sunmuştur. Karma-2000, Alperbey ve Mikham-2002 kuraklık stresine daha dayanıklı olduğu, Tatlıcak-97 ve Trica çeşitlerinin ise hassas olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, elde edilen kapsamlı bulgular, tarımsal verimliliği artırmak için daha dirençli çeşitlerin seçimi ve hassas çeşitlerin iyileştirilmesi için yol gösterici niteliktedir. Bu çalışma, farklı çeşitlerin kuraklık stresine verdikleri yanıtlar, metabolit seviyelerindeki değişikliklerle açıklanmış ve bu yanıtların metabolik adaptasyon stratejileri ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, kuraklık toleransını arttırmak için hedeflenen metabolik yolların belirlenmesine ve özellikle stres toleransı yüksek genotiplerin ıslahına katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Amor, N.B., Hamid, K.B., Debez, A., Grignon, C. and Abdelly, C. 2005. Physiological and antioxidant responses of the perennial halophyte *Crithmum maritimum* to salinity. *Plant Science*, 168: 889- 899.
- Ahmar, S., Hensel, G., ve Gruszka, D. (2023). CRISPR/Cas9-mediated genome editing techniques and new breeding strategies in cereals – current status, improvements, and perspectives. *Biotechnology Advances*, 69, 108248. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108248>.
- Aghaei, F., SeyedSharifi, R., Farzaneh, S., ve Narimani, H. (2025). Effects of biofertilizers and nano iron-silicon oxide on yield, dry matter remobilization, and trend of changes of the grain filling of triticale under salinity stress. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5559658/v1>.
- Álvarez, S., ve Acosta-Motos, J. R. (Ed.). (2023). Advances in Plant Physiology of Abiotic Stresses. *MDPI*. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-6000-7>.
- Ashrafi, M., Azimi-Moqadam, M.-R., Moradi, P., MohseniFard, E., Shekari, F., ve Kompany-Zareh, M. (2018). Effect of drought stress on metabolite adjustments in drought tolerant and sensitive thyme. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 391-399. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.009>
- Barh, D., Khan, M. S., ve Davies, E. (Ed.). (2015). PlantOmics: The Omics of Plant Science. *Springer India*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2172-2>
- Basiri, H., Alizadeh, O., Bazrafshan, F., Zare, M., Yazdani, M., ve Saed-Moucheshi, A. (2024). Superoxide dismutase (SOD) expression rate changes in response to water deficit condition in different triticale genotypes. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5188311/v1>
- Bates, L. S., Waldren, R. P., ve Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Beauchamp, C., ve Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry*, 44, 276–287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8)
- Beers, R. F., Ve Sizer, I. W. (1952). A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. *The Journal of biological chemistry*, 195, 133–140. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(19\)50881-x](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(19)50881-x)
- Bielski, S., Romaneckas, K., ve Šarauskis, E. (2020). Impact of Nitrogen and Boron Fertilization on Winter Triticale Productivity Parameters. *Agronomy* 2020, 10, 279, 10(2), 279. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10020279>
- Bogati, K., ve Walczak, M. (2022). The Impact of Drought Stress on Soil Microbial

- Community, Enzyme Activities and Plants. *Agronomy*, 12(1), 189. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010189>
- Bolaji Umar, O., Amudalat Ranti, L., Shehu Abdulbaki, A., Lukman Bola, A., Khadijat Abdulhamid, A., Ramat Biola, M., ve Oluwagbenga Victor, K. (2022). Stresses in Plants: Biotic and Abiotic. İçinde Current Trends in Wheat Research. *Intech Open*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100501>
- Bor, M., Özdemir, F., ve Türkan, I. (2003). The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. *Plant Science*, 164(1), 77-84. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00338-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00338-2)
- Bohm, W. 1979. Methods of studying root systems, *SpringerDVerlag*, Berlin.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Camerlengo, F., ve Kiszonas, A. M. (2023). Genetic factors influencing triticale quality for food. *Journal of Cereal Science*, 113, 103744. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103744>
- Chandio, A. A., Jiang, Y., Akram, W., Adeel, S., Irfan, M., ve Jan, I. (2021). Addressing the effect of climate change in the framework of financial and technological development on cereal production in Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125637. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125637>
- Chaturvedi, P., Pierides, I., López-Hidalgo, C., Garg, V., Zhang, S., Barmukh, R., Bellaire, A., Li, J., Bachmann, G., Valledor, L., Varshney, R. K., Ghatak, A., ve Weckwerth, W. (2024). Natural variation in the chickpea metabolome under drought stress. *Plant Biotechnology Journal*. <https://doi.org/10.1111/pbi.14447>
- Chaves MM, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Ann Bot*. 2009 Feb;103(4):551-60. doi: 10.1093/aob/mcn125. Epub 2008 Jul 28. PMID: 18662937; PMCID: PMC2707345.
- Cheng, S.-B., Yang, X.-Z., Zou, L., Wu, D.-D., Lu, J.-L., Cheng, Y.-R., Wang, Y., Zeng, J., Kang, H.-Y., Sha, L.-N., Fan, X., Ma, X., Zhang, X.-Q., Zhou, Y.-H., ve Zhang, H.-Q. (2022). Comparative physiological and root transcriptome analysis of two annual ryegrass cultivars under drought stress. *Journal of Plant Physiology*, 277, 153807. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153807>
- Cherian, S. and Reddy, M.P. 2003. Evaluation of NaCl tolerance in the callus cultures of *Suaeda nudiflora* Mol. *Biol Plant*, 46, 193-198.
- Curtis, T. Y., Bo, V., Tucker, A., ve Halford, N. G. (2018). Construction of a network describing asparagine metabolism in plants and its application to the identification of genes affecting asparagine metabolism in wheat under drought and nutritional

- stress. *Food and Energy Security*, 7(1). <https://doi.org/10.1002/fes3.126>
- Dai-zhen, S. (2007). Effects of PEG stress on relative water content in leaves of hexaploid triticale seedlings. Erişim adresi: 12.03.2024, <https://www.semanticscholar.org/paper/Effects-of-PEG-stress-on-relative-water-content-in-Daizhen/c8601488d7ddf51f609ab91bc5c961ecc8ff5e6e#related-papers>.
- Dangi, A. K., Sharma, B., Khangwal, I., ve Shukla, P. (2018). Combinatorial Interactions of Biotic and Abiotic Stresses in Plants and Their Molecular Mechanisms: Systems Biology Approach. *Molecular Biotechnology* 60(8), 636–650. <https://doi.org/10.1007/S12033-018-0100-9>
- DeMiguel, M., Guevara, M. Á., Sánchez-Gómez, D., de María, N., Díaz, L. M., Mancha, J. A., Fernández de Simón, B., Cadahía, E., Desai, N., Aranda, I., ve Cervera, M. T. (2016). Organ-specific metabolic responses to drought in *Pinus pinaster* Ait. *Plant Physiology and Biochemistry*, 102, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.02.013>
- Demiral, T., Ve Turkan, I. (2005). Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 53(3), 247-257. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.03.017>
- Demirbaş, S., ve Balkan, A. (2018). Tuz Stresi Koşullarında Bazı Triticale Çeşitlerinin Hidrojen Peroksit Ön Uygulamasına Tepkileri. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 15(2), 5-13.
- Dubey, A., Kumar, A., Khan, M.L. (2020). Role of Biostimulants for Enhancing Abiotic Stress Tolerance in Fabaceae Plants. In: Hasanuzzaman, M., Araújo, S., Gill, S. (eds) *The Plant Family Fabaceae*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4752-2_8
- F. Liu, P.D. Wang, X.B. Zhang, X.F. Li, X.H. Yan, D.H. Fu, G. Wu. The genetic and molecular basis of crop height based on a rice model. *Planta*, 247 (1) (2018), pp. 1-26
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A., 2009. Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29,185–212.
- Fermin, B. C., Hahm, T. S., Radinsky, J. A., Kratochvil, R. J., Hall, J. E., ve Lo, Y. M. (2005). Effect of proline and glutamine on the functional properties of wheat dough in winter wheat varieties. *Journal of Food Science*, 70. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb07183.x>.
- Fu, X., Liao, Y., Cheng, S., Deng, R., ve Yang, Z. (2021). Stable Isotope-Labeled Precursor Tracing Reveals that L -Alanine is Converted to L -Theanine via L -Glutamate not Ethylamine in Tea Plants in Vivo. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69, 15354–15361. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06660>

- Fu, X., Liu, Z., Du, X., Duan, H., Zhen, W., Zhang, Y., Shi, Z., He, M., ve Li, R. (2024). Transcriptomic and Metabolomic Analyses Reveal the Response to Short-Term Drought Stress in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*, 14(4), 704. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040704>
- Gai, Z., Zhang, M., Zhang, P., Zhang, J., Liu, J., Cai, L., Yang, X., Zhang, N., Yan, Z., Liu, L., ve Feng, G. (2023). 2-Oxoglutarate contributes to the effect of foliar nitrogen on enhancing drought tolerance during flowering and grain yield of soybean. *Scientific Reports*, 13(1), 7274. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34403-5>
- Gechev, T. S., ve Hille, J. (2012). Molecular basis of plant stress. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 69(19), 3161–3163. <https://doi.org/10.1007/s00018-012-1086-2>.
- Ghatak, A., Schindler, F., Bachmann, G., Engelmeier, D., Bajaj, P., Brenner, M., Fragner, L., Varshney, R. K., Subbarao, G. V., Chaturvedi, P., ve Weckwerth, W. (2022). Root exudation of contrasting drought-stressed pearl millet genotypes conveys varying biological nitrification inhibition (BNI) activity. *Biology and Fertility of Soils*, 58(3), 291-306. <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01578-w>
- Ghimire, K., McIntyre, I., ve Caffè, M. (2024). Evaluation of Morpho-Physiological Traits of Oat (*Avena sativa* L.) under Drought Stress . *Agriculture* (Switzerland), 14. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010109>
- Girija, A., Canales, F. J., Haddadi, B. S., Dye, R., Corke, F., Han, J., Brook, J., Williams, K., Beckmann, M., Prats, E., Doonan, J. H., ve Mur, L. A. J. (2023). Metabolomic approaches highlight two mechanisms of accelerated grain filling in Mediterranean oat (*Avena sativa* L.) cultivars during drought. <https://doi.org/10.1101/2023.06.28.546978>
- Golebiowska-Paluch, G., ve Dyda, M. (2023). The Genome Regions Associated with Abiotic and Biotic Stress Tolerance, as Well as Other Important Breeding Traits in Triticale. *Plants*, 12(3), 619. <https://doi.org/10.3390/plants12030619>
- Gregorová, Z., Kováčik, J., Klejdus, B., Maglovski, M., Kuna, R., Hauptvogel, P., ve Matušíková, I. (2015). Drought-Induced Responses of Physiology, Metabolites, and PR Proteins in *Triticum aestivum*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(37), 8125-8133. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02951>
- Gundaraniya, S. A., Ambalam, P. S., ve Tomar, R. S. (2020). Metabolomic Profiling of Drought-Tolerant and Susceptible Peanut (*Arachis hypogaea* L.) Genotypes in Response to Drought Stress. *ACS Omega*, 5(48), 31209–31219. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04601>
- Guo, X., Xin, Z., Yang, T., Ma, X., Zhang, Y., Wang, Z., Ren, Y., ve Lin, T. (2020). Metabolomics Response for Drought Stress Tolerance in Chinese Wheat Genotypes (*Triticum aestivum*). *Plants*, 9(4), 520. <https://doi.org/10.3390/plants9040520>
- Gupta, N., Thind, S. K., ve Bains, N. S. (2014). Glisin betaine application modifies biochemical attributes of osmotic adjustment in drought stressed wheat. *Plant*

Growth Regulation, 72(3), 221-228. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9853-0>

- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Rahman, A., Inafuku, M., Oku, H., ve Fujita, M. (2018). Exogenous nitric oxide donor and arginine provide protection against short-term drought stress in wheat seedlings. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 24(6), 993-1004. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0531-6>
- He, C., Zhang, W., Gao, Q., Yang, A., Hu, X., ve Zhang, J. (2011). Enhancement of drought resistance and biomass by increasing the amount of glycine betaine in wheat seedlings. *Euphytica* (C. 177, ss. 151–167). <https://doi.org/10.1007/s10681-010-0263-3>.
- Hein, J. A., Sherrard, M. E., Manfredi, K. P., ve Abebe, T. (2016). The fifth leaf and spike organs of barley (*Hordeum vulgare* L.) display different physiological and metabolic responses to drought stress. *BMC Plant Biology*, 16. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0922-1>
- Ho, S. L., Chao, Y. C., Tong, W. F., ve Yu, S. M. (2001). Sugar coordinately and differentially regulates growth- and stress-related gene expression via a complex signal transduction network and multiple control mechanisms. *Plant Physiology*, 125, 877–890. <https://doi.org/10.1104/pp.125.2.877>
- Hong, J., Yang, L., Zhang, D., ve Shi, J. (2016). Plant Metabolomics: An Indispensable System Biology Tool for Plant Science. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6), 767. <https://doi.org/10.3390/ijms17060767>
- Hussein, H.-A. A., Alshammari, S. O., Kenawy, S. K. M., Elkady, F. M., ve Badawy, A. A. (2022). Grain-Priming with L-Arginine Improves the Growth Performance of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Plants under Drought Stress. *Plants*, 11(9), 1219. <https://doi.org/10.3390/plants11091219>
- ISTA, 1996. International rules for seed testing. Rules. Seed.Sci .*Technol.*24.Supplement.
- Iyem, E., Yıldırım, M., Ve Kızılgücü, F. (2021). Germination, Seedling Growth And Physio-Biochemical Indices Of Bread Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Genotypes Under Peg Induced Drought Stress. *The Journal "Agriculture and Forestry"*, 67(1). <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.67.1.14>
- Jia, X., Sun, C., Zuo, Y., Li, G., Li, G., Ren, L., ve Chen, G. (2016). Integrating transcriptomics and metabolomics to characterise the response of *Astragalus membranaceus* Bge. var. *mongolicus* (Bge.) to progressive drought stress. *BMC Genomics*, 17(1), 188. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2554-0>
- Jiang, S. Y., Sevugan, M., ve Ramachandran, S. (2018). Valine-glutamine (VQ) motif coding genes are ancient and non-plant-specific with comprehensive expression regulation by various biotic and abiotic stresses. *BMC Genomics*, 19. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-4733-7>.
- Johnson, R. J., Stenvinkel, P., Andrews, P., Sánchez-Lozada, L. G., Nakagawa, T., Gaucher, E., Andres-Hernando, A., Rodriguez-Iturbe, B., Jimenez, C. R., Garcia,

- G., Kang, D. H., Tolan, D. R., ve Lanaspá, M. A. (2020). Fructose metabolism as a common evolutionary pathway of survival associated with climate change, food shortage and droughts. *Journal of Internal Medicine* 287, 252–262. <https://doi.org/10.1111/joim.12993>
- Kanai, M., Tamura, K., Tarnawska-Glatt, K., Goto-Yamada, S., Yamada, K., ve Mano, S. (2022). Plant Organellar Omics. *Plant Omics* 108-123. CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789247534.0008>
- Kang, Z., Babar, M. A., Khan, N., Guo, J., Khan, J., Islam, S., Shrestha, S., ve Shahi, D. (2019). Comparative metabolomic profiling in the roots and leaves in contrasting genotypes reveals complex mechanisms involved in post-anthesis drought tolerance in wheat. *Plos One*, 14(3), e0213502. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213502>
- Kasim, W. A., Osman, M. E., Omar, M. N., Abd El-Daim, I. A., Bejai, S., ve Meijer, J. (2013). Control of Drought Stress in Wheat Using Plant-Growth-Promoting Bacteria. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32(1), 122-130. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9283-7>
- Khan, M. A., Liu, D. H., Alam, S. M., Zaman, F., Luo, Y., Han, H., Ateeq, M., ve Liu, Y. Z. (2023). Molecular physiology for the increase of soluble sugar accumulation in citrus fruits under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108056>
- Khan, M. N., Zhang, J., Luo, T., Liu, J., Ni, F., Rizwan, M., Fahad, S., ve Hu, L. (2019). Morpho-physiological and biochemical responses of tolerant and sensitive rapeseed cultivars to drought stress during early seedling growth stage. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(2), 25. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2812-2>
- Khan, N., Bano, A., Rahman, M. A., Rathinasabapathi, B., ve Babar, M. A. (2019). UPLC-HRMS-based untargeted metabolic profiling reveals changes in chickpea (*Cicer arietinum*) metabolome following long-term drought stress. *Plant Cell and Environment*, 42, 115–132. <https://doi.org/10.1111/pce.13195>
- Khosravi-nejad, F., Khavari-nejad, R. A., Moradi, F., ve Najafi, F. (2022). Cytokinin and abscisic acid alleviate drought stress through changing organic acids profile, ion immolation, and fatty acid profile to improve yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28, 1119–1129. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01173-9>
- Koch, K. (2004). Sucrose metabolism: Regulatory mechanisms and pivotal roles in sugar sensing and plant development. *Current Opinion in Plant Biology* (C. 7, ss. 235–246). <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2004.03.014>
- Krishnappa, G., Gangadhara, K., Savadi, S., Kumar, S., Tyagi, B. S., Mamrutha, H. M., Yadav, S. S., Singh, G., ve Singh, G. P. (2021). Omics Technologies and Molecular Farming: Applications and Challenges. İçinde Omics Technologies for Sustainable Agriculture and Global Food Security (2th ed.) (47-67 s.). *Springer Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2956-3_3

- Kumar, M., Kumar Patel, M., Kumar, N., Bajpai, A. B., ve Siddique, K. H. M. (2021). Metabolomics and Molecular Approaches Reveal Drought Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(17), 9108. <https://doi.org/10.3390/ijms22179108>
- Lei, S., Rossi, S., ve Huang, B. (2022). Metabolic and Physiological Regulation of Aspartic Acid-Mediated Enhancement of Heat Stress Tolerance in Perennial Ryegrass. *Plants*, 11(2), 199. <https://doi.org/10.3390/plants11020199>
- LI, P. cheng, YANG, X. yi, WANG, H. miao, PAN, T., YANG, J. yuan, WANG, Y. yun, XU, Y., YANG, Z. feng, ve XU, C. wu. (2021). Metabolic responses to combined water deficit and salt stress in maize primary roots. *Journal of Integrative Agriculture*, 20, 109–119. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63242-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63242-7)
- Li, W. (2000). Effects of polygala tenuifolia wild on SOD activ-ity of RBC and GSH-Px activity of liver tissue in aging mouse caused by D-galactose. *Heilongjiang Med Pharm*, 23, 4-5.
- Li, Y., Li, S., Du, R., Wang, J., Li, H., Xie, D., ve Yan, J. (2021). Isoleucine Enhances Plant Resistance Against Botrytis cinerea via Jasmonate Signaling Pathway. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.628328>
- Liu, J., Wang, X., Hu, Y., Hu, W., ve Bi, Y. (2013). Glucose-6-phosphate dehydrogenase plays a pivotal role in tolerance to drought stress in soybean roots. *Plant Cell Reports*, 32, 415–429. <https://doi.org/10.1007/s00299-012-1374-1>
- Liu, P., Chen, L., Hamoud, Y. A., Zheng, J., Chang, T., Ali, J., Huang, H., ve Shaghaleh, H. (2024). Ameliorative effect of poly-γ-Glutamik asit biopreparation on coastal saline soil. *Heliyon*, 10(17), e36762. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36762>
- Liu, Y., Li, T., Zhang, C., Zhang, W., Deng, N., Dirk, L. M. A., Downie, A. B., ve Zhao, T. (2023). Raffinose positively regulates maize drought tolerance by reducing leaf transpiration. *Plant Journal*, 114, 55–67. <https://doi.org/10.1111/tpj.16116>
- Ma, X., Xia, H., Liu, Y., Wei, H., Zheng, X., Song, C., Chen, L., Liu, H., ve Luo, L. (2016). Transcriptomic and Metabolomic Studies Disclose Key Metabolism Pathways Contributing to Well-maintained Photosynthesis under the Drought and the Consequent Drought-Tolerance in Rice. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01886>
- MacIntyre, A. M., Meline, V., Gorman, Z., Augustine, S. P., Dye, C. J., Hamilton, C. D., Iyer-Pascuzzi, A. S., Kolomiets, M. V., McCulloh, K. A., ve Allen, C. (2022). Trehalose increases tomato drought tolerance, induces defenses, and increases resistance to bacterial wilt disease. *Plos One*, 17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266254>
- Maeda, H., ve Dudareva, N. (2012). The shikimate pathway and aromatic amino acid biosynthesis in plants. *Annual Review of Plant Biology* 63, 73–105. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105439>

- Mallikarjuna, M. G., Veeraya, P., Tomar, R., Jha, S., Nayaka, S. C., Lohithaswa, H. C., ve Chinnusamy, V. (2022). Next-Generation Breeding Approaches for Stress Resilience in Cereals: Current Status and Future Prospects. İçinde Next-Generation Plant Breeding Approaches for Stress Resilience in Cereal Crops 1–43. *Springer Nature Singapore*. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1445-4_1
- Mangena, P., ve Adejumo, S. A. (2023). Biotic Stress and Breeding of Plants for Stress Resistance 1-13. <https://doi.org/10.2174/9789815165319123020005>
- Manickam, S., Rajagopalan, V. R., Kambale, R., Rajasekaran, R., Kanagarajan, S., ve Muthurajan, R. (2023). Plant Metabolomics: Current Initiatives and Future Prospects. *Current Issues in Molecular Biology*, 45(11), 8894-8906. <https://doi.org/10.3390/cimb45110558>
- Mareri, L., Parrotta, L., ve Cai, G. (2022). Environmental Stress and Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(10), 5416. <https://doi.org/10.3390/ijms23105416>
- Meena, M., Divyanshu, K., Kumar, S., Swapnil, P., Zehra, A., Shukla, V., Yadav, M., ve Upadhyay, R. S. (2019). Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions. *Heliyon*, 5, e02952. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02952>
- Mergoum, M., Sapkota, S., El Doliefy, A. E. F. A., Naraghi, S. M., Pirseyedi, S., Alamri, M. S., ve AbuHammad, W. (2019). Triticale (x Triticosecale wittmack) breeding. *Advances in Plant Breeding Strategies: Cereals*, 5, 405-451. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23108-8_11/COVER
- Michaletti, A., Naghavi, M. R., Toorchi, M., Zolla, L., ve Rinalducci, S. (2018). Metabolomics and proteomics reveal drought-stress responses of leaf tissues from spring-wheat. *Scientific Reports*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24012-y>
- Mohammadi Alagoz, S., Hadi, H., Toorchi, M., Pawłowski, T. A., Asgari Lajayer, B., Price, G. W., Farooq, M., ve Astatkie, T. (2023). Morpho-physiological responses and growth indices of triticale to drought and salt stresses. *Scientific Reports*, 13(1), 8896. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36119-y>
- Mohammadi-Cheraghabadi, M., Ghanati, F., Karimi, N., ve Hazrati, S. (2025). Exogenous D-ornithine Enhances Drought Tolerance in Sage (*Salvia officinalis* L.) Through Modulating Water Status, Photosynthetic Performance, Osmoprotectants, and Defense Mechanisms. *Journal of Plant Growth Regulation*. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11616-0>
- Munnik, T., ve Vermeer, J. E. M. (2010). Osmotic stress-induced phosphoinositide and inositol phosphate signalling in plants. *Plant, Cell and Environment*, 33, 655–669. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02097.x>
- Munshi, A., ve Sharma, V. (2018). Omics and Edible Vaccines. Omics Technologies and Bio-Engineering 129-141. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815870-8.00008-5>

- Nešporová, T., Vítámvás, P., Kosová, K., Hynek, R., Planchon, S., ve Renaut, J. (2024). Water-saving and water-spending strategy: The physiological, proteomic and metabolomic investigation of wheat response to drought and the following recovery. *Plant Stress*, 13, 100509. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100509>
- Nezhadahmadi, A., Prodhan, Z. H., ve Faruq, G. (2013). Drought Tolerance in Wheat. *The Scientific World Journal*, 2013(1). <https://doi.org/10.1155/2013/610721>
- Niinemets, Ü. (2015). Uncovering the hidden facets of drought stress: secondary metabolites make the difference. *Tree Physiology*, 128. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv128>
- NOAA National Centers for Environmental Information (2024). Annual 2023 Global Climate Report. Accessed January 17, 2024, from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>.
- Ogbaga, C. C., Stepien, P., Dyson, B. C., Rattray, N. J. W., Ellis, D. I., Goodacre, R., ve Johnson, G. N. (2016). Biochemical analyses of sorghum varieties reveal differential responses to drought. *Plos One*, 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154423>
- Patel, M., Pandey, S., Kumar, M., Haque, M., Pal, S., ve Yadav, N. (2021). Plants Metabolome Study: Emerging Tools and Techniques. *Plants*, 10(11), 2409. <https://doi.org/10.3390/plants10112409>
- Poonam, Ahmad, S., Kumar, N., Chakraborty, P., ve Kothari, R. (2017). Plant Growth Under Stress Conditions: Boon or Bane. İçinde *Plant Adaptation Strategies in Changing Environment* 291-313. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6744-0_12
- Qi, X. F., Wang, X. H., Wang, Q., Li, M., Ma, L. J., Li, Y. Y., Li, X. M., ve Wang, L. L. (2021). Photosynthesis, stomatal conductance, endogenous hormones and organic acid synergistic regulation in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) under elevated CO₂. *Applied Ecology and Environmental Research*, 19(5), 3773–3787. https://doi.org/10.15666/aeer/1905_37733787
- Rabara, R. C., Tripathi, P., Reese, R. N., Rushton, D. L., Alexander, D., Timko, M. P., Shen, Q. J., ve Rushton, P. J. (2015). Tobacco drought stress responses reveal new targets for Solanaceae crop improvement. *BMC Genomics*, 16. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1575-4>
- Rahman, A., M. Albadrani, G., Ahmad Waraich, E., Hussain Awan, T., Yavaş, İ., ve Hussain, S. (2023). Plant Secondary Metabolites and Abiotic Stress Tolerance: Overview and Implications. *Plant Abiotic Stress Responses and Tolerance Mechanisms. IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111696>
- Rahman, M. A., Akond, M., Babar, M. A., Beecher, C., Erickson, J., Thomason, K., De Jong, F. A., ve Mason, R. E. (2017). LC-HRMS Based Non-Targeted Metabolomic Profiling of Wheat (*Triticum aestivum* L.)

- under Post-Anthesis Drought Stress. *American Journal of Plant Sciences*, 08(12), 3024–3061. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.812205>
- Raman, J., Kim, J. S., Choi, K. R., Eun, H., Yang, D., Ko, Y. J., ve Kim, S. J. (2022). Application of Lactic Acid Bacteria (LAB) in Sustainable Agriculture: Advantages and Limitations. *International Journal of Molecular Sciences* (C. 23). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijms23147784>
- Rasouli, F., Yun, P., Kiani-Pouya, A., Movahedi, A., Rasouli, M., Salehi, M., ve Shabala, S. (2024). One size does not fit all: Different strategies employed by triticale and barley plants to deal with soil salinity. *Environmental and Experimental Botany*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105585>
- Raza, A., Charagh, S., Abbas, S., Hassan, M. U., Saeed, F., Haider, S., Sharif, R., Anand, A., Corpas, F. J., Jin, W., ve Varshney, R. K. (2023). Assessment of proline function in higher plants under extreme temperatures. *Plant Biology* (C. 25, ss. 379–395). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/plb.13510>
- Razzaq, A., Sadia, B., Raza, A., Khalid Hameed, M., ve Saleem, F. (2019). Metabolomics: A Way Forward for Crop Improvement. *Metabolites*, 9(12), 303. <https://doi.org/10.3390/metabo9120303>
- Razzaq, A., Wishart, D. S., Wani, S. H., Hameed, M. K., Mubin, M., ve Saleem, F. (2022). Advances in Metabolomics-Driven Diagnostic Breeding and Crop Improvement. *Metabolites*, 12(6), 511. <https://doi.org/10.3390/metabo12060511>
- Ren, J., Liu, Y., Mao, J., Xu, Y., Wang, M., Hu, Y., Wang, S., Liu, S., Qiao, Z., ve Cao, X. (2024). Metabolomics and Physiological Methods Revealed the Effects of Drought Stress on the Quality of Broomcorn Millet during the Flowering Stage. *Agronomy*, 14(2), 236. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020236>
- Riasat, M., Kiani, S., Saed-Moucheshi, A., ve Pessarakli, M. (2019). Oxidant related biochemical traits are significant indices in triticale grain yield under drought stress condition. *Journal of Plant Nutrition*, 42(2), 111-126. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549675>
- Robin, A. H. K., Ghosh, S., ve Shahed, Md. A. (2021). PEG-Induced Osmotic Stress Alters Root Morphology and Root Hair Traits in Wheat Genotypes. *Plants*, 10(6), 1042. <https://doi.org/10.3390/plants10061042>
- Sadak, M. S., ve Ramadan, A. A. E. M. (2021). Impact of melatonin and tryptophan on water stress tolerance in white lupine (*Lupinus termis* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27, 469–481. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00958-8>
- Santos, I., Fidalgo, F., Almeida, C.M. and Salema, R. 2004. Biochemical and ultra structural changes in leaves of potato plants grown under supplementary UV-B radiation. *Plant Sci*, 167: 925-935.
- Saed-Moucheshi, A., Sohrabi, F., Fasihfar, E., Baniasadi, F., Riasat, M., ve Mozafari, A.

- A. (2021). Superoxide dismutase (SOD) as a selection criterion for triticale grain yield under drought stress: a comprehensive study on genomics and expression profiling, bioinformatics, heritability, and phenotypic variability. *BMC Plant Biology*, 21(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/S12870-021-02919-5/FIGURES/4>
- Sahoo, D. P., Van Winkle, L. J., Díaz de la Garza, R. I., ve Dubrovsky, J. G. (2021). Interkingdom Comparison of Threonine Metabolism for Stem Cell Maintenance in Plants and Animals. İçinde *Frontiers in Cell and Developmental Biology* (C. 9). *Frontiers Media S.A.* <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.672545>
- Salam, A., Ali, A., Afridi, M. S., Ali, S., ve Ullah, Z. (2022). Agrobiodiversity: Effect of Drought Stress on the Eco-physiology and Morphology of Wheat. İçinde *Biodiversity, Conservation and Sustainability in Asia* 597-618. *Springer International Publishing*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73943-0_33
- Salam, U., Ullah, S., Tang, Z.-H., Elateeq, A. A., Khan, Y., Khan, J., Khan, A., ve Ali, S. (2023). Plant Metabolomics: An Overview of the Role of Primary and Secondary Metabolites against Different Environmental Stress Factors. *Life*, 13(3), 706. <https://doi.org/10.3390/life13030706>
- Sanchez, D. H., Schwabe, F., Erban, A., Udvardi, M. K., ve Kopka, J. (2012). Comparative metabolomics of drought acclimation in model and forage legumes. *Plant, Cell and Environment*, 35, 136–149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02423.x>
- Sekmen, A.H., Turkan, I. and Takio, S. 2007. Differential in responses of antioxidative enzymes and lipid peroxidation to salt stress in salt-tolerant *Plantago maritima* and salt sensitive *Plantago media*. *Physiologia Plantarum*, 131: 399-411.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., ve Battaglia, M. L. (2021). Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shah, W., Ullah, S., Ali, S., Idrees, M., Khan, M. N., Ali, K., Khan, A., Ali, M., ve Younas, F. (2021). Effect of exogenous alpha-tocopherol on physio-biochemical attributes and agronomic performance of lentil (*Lens culinaris* Medik.) under drought stress. *Plos One*, 16(8), e0248200. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248200>
- Shanazari, M., Golkar, P., ve Mirmohammady Maibody, A. M. (2018). Effects of drought stress on some agronomic and bio-physiological traits of *Triticum aestivum*, Triticale, and *Tritipyrum* genotypes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(14), 2005-2018. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1472377>
- Sharma, S., Chauhan, A., Dobbal, S., ve Kumar, R. (2022). Biology of plants coping stresses: epigenetic modifications and genetic engineering. *South African Journal of Botany*, 144, 270-283. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.08.031>

- Sharp RE, Davies WJ. 1989. Regulation of growth and development of plants growing with a restricted supply of water. In: Jones HG, Flowers TL, Jones MB, eds. *Plants under stress*. Cambridge: Cambridge University Press, 71–93.
- Shimizu, K., Kato, H., ve Kubota, N. (1987). The measurement of growth rate of K-alum contact nuclei. *Journal of Crystal Growth* 85, 543–545. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(87\)90488-X](https://doi.org/10.1016/0022-0248(87)90488-X)
- Shulaev, V., Cortes, D., Miller, G., ve Mittler, R. (2008). Metabolomics for plant stress response. *Physiologia Plantarum*, 132(2), 199-208. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01025.x>
- Silvente, S., Sobolev, A. P., ve Lara, M. (2012). Metabolite adjustments in drought tolerant and sensitive soybean genotypes in response to water stress. *Plos One*, 7. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038554>
- Stadler, R. H. (2006). The formation of acrylamide in cereal products and coffee. İçinde *Acrylamide and Other Hazardous Compounds in Heat-Treated Foods* 23–40. Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845692018.1.23>
- Su, X., Yang, Z., Zhou, C., Geng, S., Chen, S., Cai, N., Tang, J., Chen, L., ve Xu, Y. (2024). The Response and Evaluation of Morphology, Physiology, and Biochemistry Traits in Triploid *Passiflora edulis* Sims ‘Mantianxing’ to Drought Stress. *Plants*, 13. <https://doi.org/10.3390/plants13121685>
- Suguiyama, V. F., Silva, E. A., Meirelles, S. T., Centeno, D. C., ve Braga, M. R. (2014). Leaf metabolite profile of the Brazilian resurrection plant *Barbacenia purpurea* Hook. (Velloziaceae) shows two time-dependent responses during desiccation and recovering. İçinde *Frontiers in Plant Science* (5th ed.). *Frontiers Research Foundation*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00096>
- Szabados L and Saviouré A 2010. Proline: a multifunctional amino acid. *Trends Plant Sci.* 15, 89-97.
- Tahjib-Ul-Arif, Md., Zahan, Mst. I., Karim, Md. M., Imran, S., Hunter, C. T., Islam, Md. S., Mia, Md. A., Hannan, Md. A., Rhaman, M. S., Hossain, Md. A., Brestic, M., Skalicky, M., ve Murata, Y. (2021). Citric Acid-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(13), 7235. <https://doi.org/10.3390/ijms22137235>
- Talaat, I. M., Bekheta, M. A., ve Mahgoub, M. H. (2005). Physiological response of periwinkle plants (*Catharanthus roseus* L.) to tryptophan and putrescine. *Int. J. Agric. Biol.*, 7(2), 210-213.
- Taniushkina, D., Lukashevich, A., Shevchenko, V., Belalov, I. S., Sotiriadi, N., Narozhnaia, V., Kovalev, K., Krenke, A., Lazarichev, N., Bulkin, A., ve Maximov, Y. (2024). Case study on climate change effects and food security in Southeast Asia. *Scientific Reports*, 14(1), 16150. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65140-y>
- Türkan, İ., Bor, M., Özdemir, F., ve Koca, H. (2005). Differential responses of lipid peroxidation and antioxidants in the leaves of drought-tolerant *P. acutifolius* Gray

- and drought-sensitive *P. vulgaris* L. subjected to polyethylene glycol mediated water stress. *Plant Science*, 168(1), 223-231. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.032>
- Ullah, N., Yüce, M., Neslihan Öztürk Gökçe, Z., ve Budak, H. (2017). Comparative metabolite profiling of drought stress in roots and leaves of seven Triticeae species. *BMC Genomics*, 18(1), 969. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-4321-2>
- Uluışık, S., Oney-Birol, S. Physiological and Biochemical Responses of 13 Cultivars of Triticale (x Triticosecale wittmack) to Salt Stress. *Gesunde Pflanzen* 73, 565–574 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10343-021-00578->
- Verma, S., Rastogi, M., Anjali, ., Mishra, J., ve Verma, S. (2022). A Textbook of Stress Crop Production. *B P International (a part of Sciencedomain International)*. <https://doi.org/10.9734/bpi/mono/978-93-5547-997-6>
- Vishnoi, S., ve Goel, R. K. (2024). Climate smart agriculture for sustainable productivity and healthy landscapes. *Environmental Science ve Policy*, 151, 103600. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103600>
- Wang, J., Gao, X., Wang, X., Song, W., Wang, Q., Wang, X., Li, S., ve Fu, B. (2022). Exogenous melatonin ameliorates drought stress in *Agropyron mongolicum* by regulating flavonoid biosynthesis and carbohydrate metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1051165>
- Wang, X., Guo, R., Li, M., Liu, Y., Zhao, M., Fu, H., Liu, X., Wang, S., ve Shi, L. (2019). Metabolomics reveals the drought-tolerance mechanism in wild soybean (Glisin soja). *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(9), 161. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2939-1>
- Wang, X., Guo, R., Li, M., Liu, Y., Zhao, M., Fu, H., Liu, X., Wang, S., ve Shi, L. (2019). Metabolomics reveals the drought-tolerance mechanism in wild soybean (Glycine soja). *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(9), 161. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2939-1>
- Wang, X., Li, X., ve Dong, S. (2024). Biochemical characterization and metabolic reprogramming of amino acids in Soybean roots under drought stress. *Physiologia Plantarum*, 176. <https://doi.org/10.1111/ppl.14319>
- Wani, S. H. (2023). Editorial: Mechanisms of abiotic stress responses and tolerance in plants: physiological, biochemical and molecular interventions, volume II. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1272255>
- Wehner, G. G., Balko, C. C., Enders, M. M., Humbeck, K. K., ve Ordon, F. F. (2015). Identification of genomic regions involved in tolerance to drought stress and drought stress induced leaf senescence in juvenile barley. *BMC Plant Biology*, 15(1), 125. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0524-3>
- Wójcik-Gront, E., ve Studnicki, M. (2021). Long-Term Yield Variability of Triticale (xTriticosecale wittmack) Tested Using a CART Model. *Agriculture*, 11(2), 92.

<https://doi.org/10.3390/agriculture11020092>

- Wong, J. W. H., Plett, K. L., Natera, S. H. A., Roessner, U., Anderson, I. C., ve Plett, J. M. (2020). Comparative metabolomics implicates threitol as a fungal signal supporting colonization of *Armillaria luteobubalina* on eucalypt roots. *Plant Cell and Environment*, 43, 374–386. <https://doi.org/10.1111/pce.13672>
- Xiao, Y., Dong, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, L., Liu, P., Wan, S., Xu, Q., ve Yu, Y. (2023). Two galactinol synthases contribute to the drought response of *Camellia sinensis*. *Planta*, 258. <https://doi.org/10.1007/s00425-023-04238-5>
- Xie, H., Li, M., Chen, Y., Zhou, Q., Liu, W., Liang, G., ve Jia, Z. (2021). Important Physiological Changes Due to Drought Stress on Oat. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.644726>
- Xiong, J. L., ve Ma, N. (2022). Transcriptomic and Metabolomic Analyses Reveal That Fullerol Improves Drought Tolerance in *Brassica napus* L. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms232315304>
- Yadav, B., Jogawat, A., Rahman, M. S., ve Narayan, O. P. (2021). Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: A review. *Gene Reports*, 23, 101040. <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2021.101040>
- Yakunina, A. V., ve Sinitsyna, Y. V. (2023). Influence of Salicylic and Succinic Acids on the Indicators of Growth and Photosynthesis and the Content of Chlorophyll in Wheat Plants Grown under Water Deficiency. *Агрохимия*, 39–48. <https://doi.org/10.31857/s000218812301012x>
- Yang, D., Zhang, S., Tian, X., ve Du, W. (2023). Morphological and physiological traits of triticale as affected by drought stress. *Chilean journal of agricultural research*, 83(2), 203-216. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392023000200203>
- Yang, L., Fountain, J. C., Ji, P., Ni, X., Chen, S., Lee, R. D., Kemerait, R. C., ve Guo, B. (2018). Deciphering drought-induced metabolic responses and regulation in developing maize kernels. *Plant Biotechnology Journal*, 16, 1616–1628. <https://doi.org/10.1111/pbi.12899>
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., ve Chen, S. (2021). Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>
- Yin, X., Liu, S., Qin, Y., Xing, R., Li, K., Yu, C., Chen, X., ve Li, P. (2021). Metabonomics analysis of drought resistance of wheat seedlings induced by β -aminobutyric acid-modified chitoooligosaccharide derivative. *Carbohydrate Polymers*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118437>
- You, J., Zhang, Y., Liu, A., Li, D., Wang, X., Dossa, K., Zhou, R., Yu, J., Zhang, Y., Wang, L., ve Zhang, X. (2019). Transcriptomic and metabolomic profiling of drought-tolerant and susceptible sesame genotypes in response to drought stress. *BMC Plant Biology*, 19(1), 267. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1880-1>

- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., Huang, S., Chen, H., ve Ao, X. (2024). Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review. *Agronomy*, 14(7), 1360. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>
- Zahedi, S. M., Karimi, M., ve Venditti, A. (2021). Plants adapted to arid areas: specialized metabolites. *Natural Product Research*, 35(19), 3314-3331. <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1689500>
- Zhang, S., Ghatak, A., Bazargani, M. M., Bajaj, P., Varshney, R. K., Chaturvedi, P., Jiang, D., ve Weckwerth, W. (2021). Spatial distribution of proteins and metabolites in developing wheat grain and their differential regulatory response during the grain filling process. *The Plant Journal*, 107(3), 669-687. <https://doi.org/10.1111/tpj.15410>
- Zhang, S., Ghatak, A., Mohammadi Bazargani, M., Kramml, H., Zang, F., Gao, S., Ramšak, Ž., Gruden, K., Varshney, R. K., Jiang, D., Chaturvedi, P., ve Weckwerth, W. (2024). Cell-type proteomic and metabolomic resolution of early and late grain filling stages of wheat endosperm. *Plant Biotechnology Journal*, 22(3), 555-571. <https://doi.org/10.1111/pbi.14203>
- Zhang, X., Wang, Z., Li, Y., Guo, R., Liu, E., Liu, X., Gu, F., Yang, Z., Li, S., Zhong, X., ve Mei, X. (2022). Wheat genotypes with higher yield sensitivity to drought overproduced proline and lost minor biomass under severer water stress. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1035038>
- Zhao, T., Wu, X., ve Jiang, M. (2023). Editorial: Advanced breeding for abiotic stress tolerance in crops. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1265339>
- Zhi, X., Bian, X., Yu, J., Xiao, X., Duan, B., Huang, F., Jiang, Z., Zhou, G., ve Ma, N. (2024). Comparative metabolomics analysis of tolerant and sensitive genotypes of rapeseed (*Brassica napus* L.) seedlings under drought stress. *Agricultural Water Management*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108797>