

Mısır Varyatelerinin Kuraklık Stresine Morfolojik, Fizyolojik, Enzimatik ve Moleküler  
Tepkileri

Gökhan Eskiköy

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Tarla Bitkileri Anabilim Dalı

Mayıs 2024



Morphological, Physiological, Enzymatic and Molecular Responses of Maize Varieties to  
Drought Stress

Gökhan Eskiköy

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Field Crops

May 2024

Mısır Varyatelerinin Kuraklık Stresine Morfolojik, Fizyolojik, Enzimatik ve Moleküler  
Tepkileri

Gökhan Eskiköy

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Tarla Bitkileri Anabilim Dalı

Tahıllar ve Yemelik Tane Baklagiller Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. İmren Kutlu

“ESOGÜ-BAP tarafından FYL-2023-2791 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.”

Mayıs 2024

## ONAY

Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Gökhan Eskiköy**'ün YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Mısır Varyatelerinin Kuraklık Stresine Morfolojik, Fizyolojik, Enzimatik ve Moleküler Tepkileri” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. İmren Kutlu

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. İmren Kutlu

Üye: Prof. Dr. Köksal Yağdı

Üye: Prof. Dr. Süleyman Avcı

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma Tümsek

Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. İmren Kutlu danışmanlığında hazırlamış olduğum “Mısır Varyatelerinin Kuraklık Stresine Morfolojik, Fizyolojik, Enzimatik ve Moleküler Tepkileri” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 31/05/2024

Gökhan Eskiköy

İmza

## ÖZET

Cin mısırı (*Zea mays var. everta*), şeker mısırı (*Zea mays var. saccharata*) ve atdışi mısır (*Zea mays var. indentata*) gibi ticari açıdan önemli mısır varyeteleri yaygın olarak üretilmekte ve tüketilmektedir. Mısır su talebi yüksek bir bitki olduğu için kuraklık mısır üretimini sınırlandıran temel faktördür. Bu çalışmada, kuraklık stresinin mısır varyeteleri üzerindeki etkileri, bitki boyu, yaprak alanı, bitkinin taze ve kuru ağırlığı, klorofil içeriği, membran dayanıklılık indeksi, malondialdehit ve hidrojen peroksit içeriği, yaprak oransal su kapsamı, turgor kaybı, prolin içeriği, antioksidan enzim aktiviteleri ve HSP70 ve HSP90 gen ekspresyonu özellikleri bakımından araştırılmıştır. Artan kuraklık stresi altında bitki boyu, yaprak alanı, bitki yaş ve kuru ağırlığı, klorofil içeriği azalırken, elektrolit sızıntısı artmıştır. Farklı mısır türleri arasında bitki boyu en yüksek olan şeker mısırında kuraklık stresi bitki boyunda en fazla azalmaya neden olmuştur. Atdışi mısır orta dereceli kuraklık altında yaprak alanında en az negatif değişimi göstermiş, bunu şeker ve cin mısırı izlemiştir. Şiddetli kuraklık bitkilerde %50'nin üzerinde ağırlık kaybına neden olurken, at dişi mısır en az kuru madde kaybına uğramıştır. Ek olarak, atdışi mısır tüm sulama seviyelerinde en yüksek klorofil içeriğine sahip olmuştur. Şiddetli kuraklığın etkileri, nispeten yüksek su kapsamı ve turgor kaybına, membran hasarına, enzim aktivitelerine ve HSP90 gen ekspresyonuna sahip olan şeker mısırda daha belirgin olarak gözlemlenmiştir. Hem orta hem de şiddetli kuraklıkta su kapsamını ve turgorunu koruyabilen ve daha az MDA ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> birikimine rağmen antioksidan enzim aktivitelerini belirli bir düzeyde tutarak savunma mekanizmasını etkin bir şekilde kullanan atdışi mısır, nispeten yüksek kuraklık toleransı sergilemiştir. Cin mısırındaki yüksek MDA ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> seviyelerine rağmen, antioksidan enzim aktivitelerinin ve HSP70 gen ve protein ekspresyonunun yukarı regülasyonu, kuraklıkla başa çıkma mekanizmasının aktive olduğunu göstermektedir. Özellikle HSP70'in prolin ve HSP90'ın enzim aktiviteleriyle pozitif korelasyonu, HSP'ler ile diğer stres yanıt sistemleri arasındaki ilişkileri inceleyen çalışmalar için önemli bir sonuçtur. İncelenen tüm özellikler bir arada değerlendirildiğinde atdışi mısırının diğer mısır varyetelerine göre kuraklığa daha toleranslı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Kuraklık stresi, mısır, antioksidan enzimler, ısı şoku proteinleri, prolin

## SUMMARY

Maize subspecies of commercial importance, including popcorn (*Zea mays everta*), sugar maize (*Zea mays saccharata*), and dent maize (*Zea mays indentata*), are widely produced and consumed. Given that maize is a plant with high water demand, drought is the main factor limiting maize production. The present study examined the effects of drought stress on maize plants, including plant height, leaf area, fresh and dry weight of the plant, chlorophyll content, membrane durability index, malondialdehyde and hydrogen peroxide and leaf relative water content, turgor loss, proline content, antioxidant enzyme activities and HSP70 and HSP90 gene expression characteristics. These were examined according to differences between subspecies. In response to increasing drought stress, plant height, leaf area, fresh and dry weight, and chlorophyll content decreased, while electrolyte leakage increased. The greatest decrease in plant height was observed in sugar maize. The least negative change in leaf area was observed in dent maize under moderate drought conditions, followed by sugar and popcorn maize. While severe drought resulted in over 50% weight loss in plants, dent maize exhibited the least dry matter loss. Furthermore, dent maize showed the highest chlorophyll content at all irrigation levels. The effects of severe drought were more pronounced in sugar maize, which exhibited relatively high water content and turgor loss, membrane damage, enzyme activities, and HSP90 gene expression. Dent maize demonstrated the capacity to maintain its water content and turgor in both moderate and severe droughts, and exhibited effective utilization of its defense mechanism, evidenced by the maintenance of antioxidant enzyme activities at a consistent level despite a reduction in MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> accumulation. Despite the high levels of MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in popcorn, the upregulation of antioxidant enzyme activities and HSP70 gene and protein expression indicates that the drought coping mechanism is activated. In particular, the positive correlation between HSP70 and proline, also HSP90 and enzyme activities is a significant finding for studies examining the relationships between HSPs and other stress response systems. Upon comprehensive evaluation of all examined characteristics, it was observed that dent maize had greater drought tolerance than other maize subspecies.

**Keywords:** Drought stress, maize, antioxidant enzymes, heat shock proteins, proline

## TEŞEKKÜR

Çalışmaktan büyük keyif aldığım tez çalışmamın planlanması, yürütülmesi ve tamamlanma sürecinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli danışmanım Doç. Dr. İmren KUTLU'ya, laboratuvar çalışmaları sırasında yardımlarını esirgemeyen yoğun desteklerini gördüğüm Gülcan ESER'e, Ziraat Yüksek Mühendisleri Merve BEŞER ve Rana ÖZSOY'a şükranlarımı sunar, minnettar olduğumu belirtmek isterim. Projemize verdiği desteklerden dolayı Eskişehir Osmangazi Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri komisyonuna teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her alanında, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her daim yanımda olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                              |      |
|--------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                                    | vi   |
| SUMMARY.....                                                 | vii  |
| TEŞEKKÜR.....                                                | viii |
| İÇİNDEKİLER.....                                             | ix   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                         | xii  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                       | xiv  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....                          | xv   |
| 1. GİRİŞ ve AMAÇ.....                                        | 1    |
| 2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                | 6    |
| 2.1. Morfolojik ve Fizyolojik Özellikler.....                | 6    |
| 2.2. Enzimatik ve Moleküler Özellikler.....                  | 11   |
| 3.MATERYAL VE YÖNTEM.....                                    | 23   |
| 3.1. Bitki Materyali.....                                    | 23   |
| 3.2. Deneme Toprağı.....                                     | 23   |
| 3.3. Tarla Kapasitesinin Belirlenmesi.....                   | 24   |
| 3.4. Bitkilerin Yetiştirilmesi ve Kuraklık Uygulamaları..... | 24   |
| 3.5. Bitki Analizleri.....                                   | 27   |
| 3.5.1. Bitki boyu (cm).....                                  | 27   |
| 3.5.2. Yaprak alanı (cm <sup>2</sup> ).....                  | 27   |

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                         | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 3.5.3. Yaprak klorofil içeriği (Spectrum units).....                                                    | 27                  |
| 3.5.4. Bitki yaş ve kuru ağırlığı (g).....                                                              | 27                  |
| 3.5.5. Yaprak oransal su kapsamı (YOSK) ve turgor kaybı (TK).....                                       | 27                  |
| 3.5.6. Prolin içeriği.....                                                                              | 28                  |
| 3.5.7. Çözünebilir protein içeriği.....                                                                 | 28                  |
| 3.5.8. Elektrolit sızıntısı (ES), zararlanma yüzdesi (ZY) ve membran dayanıklılık<br>indeksi (MDİ)..... | 29                  |
| 3.5.9. Malondialdehit (MDA) miktarı.....                                                                | 29                  |
| 3.5.10. Hidrojen peroksit (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) miktarı.....                                 | 30                  |
| 3.5.11. Antioksidan enzim aktiviteleri.....                                                             | 30                  |
| 3.5.12. HSP70 ve HSP90 gen ekspresyon seviyeleri.....                                                   | 31                  |
| 3.5.13. HSP70 ve HSP90 için Western blotlama.....                                                       | 32                  |
| 3.6. İstatiksel Analizler.....                                                                          | 33                  |
| <b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>                                                                     | <b>34</b>           |
| 4.1. Bitki Boyu ve Yaprak Alanı.....                                                                    | 34                  |
| 4.2. Bitkilerin Klorofil İçerikleri.....                                                                | 36                  |
| 4.3. Bitkilerin Yaş ve Kuru Ağırlıkları.....                                                            | 37                  |
| 4.4. Bitkilerin Yaprak Oransal Su Kapsamı ve Turgor Kaybı.....                                          | 39                  |
| 4.5. Bitkilerin Prolin ve Çözünebilir Protein İçerikleri.....                                           | 41                  |

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.6. Bitkilerin Elektrolit Sızıntısı, Zararlanma Yüzdesi ve Membran Dayanıklılık İndeksleri..... | 44        |
| 4.7. Bitkilerin Malondialdehit ve Hidrojen Peroksit İçerikleri.....                              | 46        |
| 4.8. Bitkilerin Antioksidan Enzim Aktiviteleri.....                                              | 49        |
| 4.9. Bitkilerin HSP70 ve HSP90 Gen ve Protein Ekspresyon Seviyeleri.....                         | 52        |
| 4.10. İncelenen Parametreler Arasındaki Korelasyonlar.....                                       | 56        |
| <b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                                                 | <b>59</b> |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>                                                                     | <b>60</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u>                                                                                                                                                   | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.1. Denemede yetiştirilen bitkiler ve kuraklık uygulamaları arasındaki farklılıklar.....                                                                      | 25           |
| 3.2. Toprak nem ölçer cihazı ile tarla kapasitesinin ölçülmesi.....                                                                                            | 26           |
| 3.3. RNA izalasyonu ve Real-Time PCR analizi.....                                                                                                              | 32           |
| 3.4. Western blotlama işleminin bazı basamaklarından görüntüler.....                                                                                           | 33           |
| 4.1. Mısır bitkilerinde kuraklık stresi altında bitki boyu (cm) ve yaprak alanı (cm <sup>2</sup> )<br>değişimleri.....                                         | 35           |
| 4.2. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinde klorofil içeriği (CM) değişimi.....                                                                            | 37           |
| 4.3. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin yaş ve kuru ağırlığının (g) değişimi.....                                                                      | 38           |
| 4.4. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin yaprak oransal su kapsamı ve turgor kaybı<br>(%) değişimi.....                                                 | 41           |
| 4.5. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin prolin (µmol g <sup>-1</sup> TA) ve çözünebilir protein<br>(mg g <sup>-1</sup> TA) içeriklerinin değişimi..... | 43           |
| 4.6. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin elektrolit sızıntısı, zararlanma yüzdesi<br>ve membran dayanıklılık indeksi (%) değişimi.....                  | 45           |
| 4.7. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin malondialdehit (nmol g <sup>-1</sup> TA) ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub><br>(µmol g <sup>-1</sup> TA).....    | 48           |
| 4.8. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin antioksidan enzim (SOD, APX ve<br>CAT) aktivitelerinin değişimi.....                                           | 51           |
| 4.9. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin HSP70 ve HSP90 gen<br>ekspresyonlarının değişimi.....                                                          | 53           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sekil

### Sayfa

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.10. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin HSP70 ve HSP90 protein<br>ekspresyonlarının değişimi..... | 54 |
| 4.11. Araştırmada incelenen özellikler arasındaki Pearson korelasyon katsayıları.....                      | 57 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Cizelge</u>                                                                                                                                                     | <u>Sayfa</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 3.1. Araştırma topraklarının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri.....                                                                                            | 24           |
| 3.2. Ekspresyon analizi yapılan genlerin primer dizilimi.....                                                                                                      | 32           |
| 4.1. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının bitki boyu ve yaprak alanına etkisini gösteren varyans analizi.....                                               | 34           |
| 4.2. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının klorofil içeriğine etkisini gösteren varyans analizi.....                                                         | 36           |
| 4.3. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının bitki yaş ve kuru ağırlığına etkisini gösteren varyans analizi.....                                               | 37           |
| 4.4. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının yaprak oransal su kapsamı ve turgor kaybı etkisini gösteren varyans analizi.....                                  | 39           |
| 4.5. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının prolin ve çözünebilir protein içeriğine etkisini gösteren varyans analizi.....                                    | 42           |
| 4.6. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının elektrolit sızıntısı, zararlanma yüzdesi ve membran dayanıklılık indeksine etkisini gösteren varyans analizi..... | 44           |
| 4.7. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının MDA ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> içeriğine etkisini gösteren varyans analizi.....                             | 47           |
| 4.8. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının antioksidan enzim (SOD, APX ve CAT) aktivitesine etkisini gösteren varyans analizi.....                           | 49           |
| 4.9. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının HSP70 ve HSP90 gen ekspresyonlarına etkisini gösteren varyans analizi.....                                        | 52           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| $\text{CaCO}_3$        | Kalsiyum Karbonat   |
| Cu                     | Bakır               |
| Fe                     | Demir               |
| $\text{K}_2\text{O}$   | Potasyum Oksit      |
| Mg                     | Magnezyum           |
| Mn                     | Mangan              |
| $\text{P}_2\text{O}_5$ | Difosfor Pentaoksit |
| Zn                     | Çinko               |

### Kisaltmalar

### Açıklama

|                        |                         |
|------------------------|-------------------------|
| g                      | Gram                    |
| mg                     | Miligram                |
| ml                     | Mililitre               |
| mM                     | Milimolar               |
| pH                     | Potansiyel Hidrojen     |
| $\mu\text{l}$          | Mikrolitre              |
| $\mu\text{mol}$        | Mikromol                |
| APX                    | Askorbat peroksidaz     |
| CAT                    | Katalaz                 |
| CM                     | Klorofil birimi         |
| $\text{CO}_2$          | Karbon Dioksit          |
| DNA                    | Deoksiribo nükleik asit |
| $\text{H}_2\text{O}_2$ | Hidrojen peroksit       |
| HSP                    | Isı Şoku Proteinleri    |
| O.M.                   | Organik Madde           |
| RNA                    | Ribonükleik Asit        |
| ROT                    | Reaktif Oksijen Türleri |

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ****Kısaltmalar****Açıklama**

S.D.

Serbestlik Derecesi

SOD

Süperoksit Dismutaz

TK

Turgor Kaybı

YOSK

Yaprak Oransal Su Kapsamı



## 1. GİRİŞ ve AMAÇ

Mısır (*Zea mays L.*), ekonomik açıdan önemli yere sahip olan atdışı mısır (*Zea mays var. indendata*), cin mısırı (*Zea mays var. everta*) ve şeker mısırı (*Zea mays var. saccharata*) dahil olmak üzere yedi alt türü olan bir tahıldır. Mısır bitkisi tarih boyunca alt türlerine bağlı olarak çeşitli şekillerde değerlendirilmiştir (Chaudhary vd., 2014). Mısırın endüstriyel hammadde, insan ve hayvan gıdası olmak üzere çeşitli kullanım alanları vardır. Atdışı mısır, hayvan beslemede ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sapları ve yaprakları, özellikle silaj şeklinde hayvan yemi olarak yaygın olarak kullanılır. Ayrıca kağıt yapımında ve küçük ölçekli hasır el sanatlarında da kullanılmaktadır. Atdışı mısırın diğer özel kullanım alanları arasında yağ ve tatlandırıcı üretiminin yanı sıra biyoyakıt-biyoetanol üretimi de yer almaktadır. Cin mısırı ve şeker mısırı genellikle atıştırmalık olarak tüketilmektedir (Ranum vd., 2014). Mısır ekimi geniş kullanım alanı nedeniyle geniş alanlara yayılmıştır. Ancak iklim değişikliği, mısır üretimini ciddi şekilde tehdit edebilecek kuraklık stresi de dahil olmak üzere çeşitli abiyotik streslere yol açabilmektedir (Kim ve Lee, 2023).

Küresel mısır verimi kayıplarının yaklaşık %15'i kuraklık stresinden kaynaklanmaktadır. Sıcak iklimlerde birçok hastalığın yayılması ve mısır üretim alanlarının kuraklık ve yüksek sıcaklıklara maruz kalması mısır verimini büyük ölçüde etkileyecektir. Kurak alanlarda mısır verimini korumak ve öngörülen verim kayıplarını dengelemek için mısırın kuraklığa direncini arttırmak gerekmektedir (Adewale vd., 2018; Rasheed vd., 2023). Kuraklığa tolerans, bir bitkinin hayatta kalma veya stresten kurtulma çabalarının bir sonucudur ve bitkilerin kuraklık karşısında bile büyümesine ve nispeten yüksek verimi korumasına olanak tanır. Toleransın belirli bir nesille sınırlı olması durumunda, bir bitkinin kuraklığa alışmış olduğu kabul edilir. Bir bitki genotipinin toleransının birkaç nesil boyunca devam etmesi durumunda kuraklık koşullarına adapte olduğu kabul edilir (Seleiman vd. 2021).

Kuraklık, bitkileri büyüme ve gelişmelerinin çeşitli aşamalarında etkileyen bir stres faktörüdür. Su stresinin bitki büyümesi ve verimi üzerindeki etkisi, stresin süresine, şiddetine ve gelişim aşamasına bağlıdır (Raza vd., 2023). Mısırın vejetatif aşamalarda su talebi düşük olmasına rağmen, erken vejetatif büyüme ve geç tane doldurma aşamalarında

hafif su stresine sahip mısırın hala önemli derecede su stresi toleransı gösterebildiği gözlemlenmiştir (Song vd., 2019). Kısıtlı bir su kaynağı bitki boyunu azaltır, bu da çiçeklenme sırasında asimilat rekabetini azaltabilir (Anjum vd., 2017). Vejetatif büyüme aşamasında su stresi, mısır bitkisinin büyümesini ve yaprak alanını ciddi şekilde engelleyebilir, bu da verimin düşmesine neden olabilir (Zhou vd., 2020). Yaprak alanı ve yapraklarda kuru madde birikimi, bitkinin suyu kullanabilmesi veya hayatta kalabilmesiyle yakından ilgili olan önemli özelliklerdir. Bu nedenle genellikle bir bitkinin kuraklık sırasındaki performansını değerlendirmek için kullanılırlar (Zhou vd., 2020).

Klorofil, fotosentezde kullanılan kloroplastların birincil bileşenidir. Fotosentetik aktivitenin oranı, klorofil içeriğinin yüzdesi ile pozitif olarak ilişkilidir. Klorofil içeriğindeki azalmanın, kuraklık stresi altında pigment foto-oksidasyonu ve klorofil bozulmasından kaynaklanabilecek oksidatif stresin tipik bir işareti olduğu ileri sürülmüştür (Kaur ve Kumar, 2020). Bitkiler öncelikle ışık Emilimi ve indirgeyici maddelerin sentezi için fotosentetik pigmentlere ihtiyaç duyar. Erişilemeyen toprak suyu, mısırın metabolik aktivitesini zayıflatır, biyokütle birikimini azaltır ve yaprak klorofilindeki azalma yoluyla fotosentezi yavaşlatır (Athar ve Ashraf, 2005). Bu durum sonuçta mısır veriminin azalmasına yol açar.

Kuraklık stresine ilk tepki olarak bitkiler, ozmotik basıncı düzenleyerek hücre su durumunu ve turgorunu korumaya çalışırlar (Sanders ve Arndt, 2012). Ozmotik ayarlamayı doğru bir şekilde değerlendirmek için, yaprağın bağıl su içeriği, turgor kaybı ve prolin gibi ozmotik düzenleyici çözünenlerin varlığı gibi çeşitli temel parametrelerin değerlendirilmesi önemlidir. Diğer stres tepki mekanizmaları arasında membran hasarı, lipid peroksidasyonu, reaktif oksijen türlerinin (ROT) birikmesi, antioksidanların aktivasyonu ve kuraklık stresiyle ilişkili bazı genlerin ekspresyonu yer alır.

Yaprak oransal su kapsamı, diğer göstergelere göre bitki organları, çeşitleri ve potansiyel olarak türler arasında daha tutarlı bir göstergedir. Bunun nedeni, bitkilerin su dengesini korumak ve turgor kaybını önlemek için yaptığı fizyolojik ve morfolojik değişikliklerin birleşik etkisini yansıtmasıdır (Sapes ve Sala, 2021). Yaprak oransal su kapsamı, turgor kaybı noktasına ulaştığında, hücre su hacminin belirli eşiklerin üzerinde tutulması yoluyla hücre turgorunun sürdürülmesi gerekliliği nedeniyle bitkilerin yüksek bir ölüm riski sergilemesi muhtemeldir. Yaprak oransal su kapsamı, bir bitkinin, organın veya

dokunun gerçek su içeriğini maksimum kapasitesine kıyasla gösterdiği için özellikle önemlidir (Lambers vd., 2019).

Bitkiler, kuraklık stresine karşı bir savunma aracı olarak ozmotik düzenlemeyi kolaylaştırmak için prolin birikiminden yararlanır. Bitki vakuolleri, ozmotik basıncı düzenleme yetenekleri nedeniyle prolin depolama için en uygun konumdur. Bir hücre ozmotik strese maruz kaldığında prolin sitoplazmaya taşınır ve sitoplazmik yoğunlaşma artar, böylece ozmotik potansiyel düşer. Bu, hücrenin ozmotik potansiyeli düşük olduğunda bile prolin hücre dışı suyu emmeye devam etmesine olanak tanır ve hücrenin protoplazması ile çevre arasındaki ozmotik dengeyi korur (Shakeri vd., 2019). Proteinlerin yüzeyinde su moleküllerinin varlığı, proline bağlanabilecek koruyucu bir tabakanın oluşumunu kolaylaştırabilir. Bu işlem, su kaybını azaltmaya ve suyun hücre dışına akışını kısıtlamaya, böylece koruyucu bir zar oluşturmaya yarar. Ayrıca koruyucu membran, proteinler ve diğer makromoleküller için etkili koruma sağlayarak biyolojik makromoleküllerin yüksek yapısını ve aktivitesini korur. Prolin, bitki proteinlerinin stres altındayken hidrofilikliğini artırmak için denatüre proteinlerle birleşebilir (Yang vd. 2021).

Su stresinin neden olduğu hücre zarı hasarının boyutunu belirlemek için hücrelerden elektrolit sızıntısı ölçülebilir (Baji vd., 2002). Hücre zarlarının genellikle bitki stresinin birincil hedefi olduğu göz önüne alındığında, bir bitkinin kuraklığa dayanma yeteneğinin, su stresi karşısında zar bütünlüğünü ve stabilitesini koruma kapasitesiyle yakından bağlantılı olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir (Rawat vd., 2021) . Dehidrasyonun, fotosentez de dahil olmak üzere çoğu fizyolojik ve biyokimyasal süreç için hayati önem taşıyan zarın bozulmasına neden olduğu bilinmektedir. Kuraklık stresi sıklıkla biyolojik membranlara ve membran sistemlerine zarar verebilecek ROT üretimine yol açar. Ancak fotosentetik organizmalar olan bitkiler, hücresel metabolizmayı iyileştirmek ve kuraklığın neden olduğu fizyokimyasal hasara karşı korunmak için fotosentetik membranlarındaki lipitleri düzenleyebilir (Öztürk vd., 2021).

Kuraklık stresi altında bitki hücre zarları hızlı hasara ve sızıntıya karşı daha duyarlı hale gelir. Membrandaki bu sızıntıya, lipit peroksidasyonuna neden olan serbest radikallerin kontrolsüz artışı neden olur. Hücre zarının yağ asitlerinin hasar görmesi, malondialdehit (MDA) gibi küçük hidrokarbonların oluşmasına neden olabilir. Malondialdehit, lipid

peroksidasyonunun son ürünüdür ve membran hücresel hasarının bir belirteci olarak görev yapar (Gharibi vd., 2016). Lipit peroksidasyonuna ve oksidatif hasara neden olan hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ve diğer toksik oksijen türlerinin üretiminin de kuraklık stresi tarafından tetiklendiği iyi bilinmektedir. Hidrojen peroksidin güçlü bir oksidan olduğu göz önüne alındığında, yaprak hücrelerinde lokalize oksidatif hasarı başlatabilir, bu da metabolik fonksiyonun bozulmasına ve hücresel bütünlüğün kaybına neden olabilir (Černý vd., 2018).

Su stresi, metabolik fonksiyonları bozan ve proteinlere, RNA'ya, DNA'ya ve hücre zarlarına zarar veren ROT üretimi ve birikimindeki artışa bağlı olarak hücresel redoks dengesizliğine neden olur (Choudhury vd., 2017). Bununla birlikte, hem enzimatik hem de enzimatik olmayan antioksidan savunma sistemlerinin aktive edilmesiyle ROT hasarı önlenabilir veya hafifletilebilir. Süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT) ve askorbat peroksidaz (APX) enzimleri, ROT'un temizlenmesi için gerekli olan, bitkilerde bulunan benzersiz ROT eliminasyon sistemlerinden yalnızca birkaçıdır. Bu enzimler, çeşitli bitki hücresi bölmelerinde mevcut olmasının yanı sıra, apoplastta ve plazma zarında hücre dışı olarak tespit edilebilir (Hasanuzzaman vd., 2020). Reaktif oksijen türlerine karşı ilk savunma hattı, süperoksit radikallerinin ( $O_2^{\cdot-}$ )  $H_2O_2$  ve moleküler oksijene dönüşümünü hızlandırarak işlev gören SOD'dur.  $H_2O_2$  reaktif bir tür olduğundan CAT ve APX onu  $O_2$  ve  $H_2O$ 'ya dönüştürür (Rajput vd., 2021). SOD ve CAT birçok hücre altı bölgede bulunur çünkü antioksidan savunmanın ilk hattı olarak uyum içinde işlev görürler. Kuraklık toleransı, bu tür moleküllerin zararlı etkilerini azaltan etkili bir ROT temizleme yeteneği ile ilişkilendirilmiştir. Dahası, abiyotik stres faktörlerinin neden olduğu oksidan ve antioksidan metabolizmasındaki değişiklikler, bitkilerde biyokimyasal stres belirteçleri olarak işlev görebilir (de Araújo Silva vd., 2021).

Stresle ilişkili genlerin ifadesindeki önemli değişiklikler tipik olarak kuraklık stresi sırasında ortaya çıkan moleküler reaksiyonların sonucudur (Singh vd., 2019). Isı şoku proteinleri (HSP'ler), bitkilerin yaşadığı neredeyse tüm stres biçimlerine yanıt olarak yukarı regülasyon sergileyen, stresle ilişkili genler arasında en sık oluşan moleküler bileşenlerdir (Priya vd., 2019). Multigen aileleri HSP70 ve HSP90 yüksek oranda korunmuştur ve hem kurucu hem de uyarılabilir üyeler içerir. Bu protein grupları, endoplazmik retikulum, plastidler, mitokondri ve sitoplazma/çekirdek membranda moleküler şaperon görevi görür. Yukarıda bahsedilen proteinler, tipik büyüme koşulları altında hücre içi translokasyonu,

sinyal iletimini ve protein katlanmasını kolaylaştırır (Kozeko, 2021). Bir grup sinyal ve düzenleyici proteinin HSP90 substratı olarak görev yaptığı iyi bilinmektedir. Olumsuz durumlarda, hücrel havuza uyarılabilir şaperonlar eklenir ve burada hasarlı proteinlerin toplanmasını durdurmada ve yeniden katlanmalarını teşvik etmede çok önemli bir rol oynarlar. Ek olarak HSP'ler, en önemlisi stoma kapanmasının düzenlenmesi ve ısı şoku tepkisinin otoregülasyonu olmak üzere çeşitli işlevlerde rol oynar (Augustine, 2019). Çeşitli bitki türlerinin susuz kaldığında belirli HSP70'leri yukarı regüle ettiği gösterilmiştir (Augustine vd., 2015; Chaudhary vd., 2019; Landi vd., 2019). Özellikle, *Arabidopsis*'te (Swindell vd., 2007), çeltikte (Hu vd., 2009; Zou vd., 2009), patatest (Ambrosone vd., 2013) ve arpada (Chaudhary vd., 2019) su eksikliği sırasında belirli HSP90'ların yukarı regüle edildiğini gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Li vd. (2021), kuraklığa duyarlı genotipte hücrel hasarı önlemek için HSP90, HSP70 ve küçük HSP'lerin ekspresyonunun indüklendiğini bildirmiştir. Buna karşılık, kuraklık stresi altında kuraklığa toleranslı genotipte küçük HSP'lerin ifadesinin yukarı doğru düzenlendiği bulunmuştur.

Atdışı mısır, cin mısırı ve şeker mısırı varyeteleri bitki özellikleri, büyüme ve gelişme, stres koşullarına dayanıklılık ve kullanım amaçları bakımından farklılık gösterir. Önceki çalışmalarda yalnızca tek bir varyetenin farklı çeşitleri kuraklığa tolerans açısından karşılaştırılmıştır (Anjum vd., 2016; Kamphorst vd., 2019; Ali vd., 2023; Mousavi vd., 2023; Schmitt vd., 2024). Kuraklık stresi altında farklı varyeteleri birbirleriyle karşılaştıran bir çalışma mevcut bilgilerimize göre bulunmamaktadır. Ek olarak, ısıyla indüklenebilir HSP'lerin dehidrasyon altındaki hücrelerin korunmasındaki rolü tam olarak anlaşılmamıştır. Mısırdaki kuraklık stresine toleransın altında yatan mekanizmaları belirlemek amacıyla HSP'ler ve diğer stres tepki mekanizmaları arasındaki etkileşimi aydınlatmak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, farklı mısır varyetelerini bitkisel özellikler, klorofil içeriği, bitki su durumu, prolin içeriği, hücre hasarı ve antioksidan enzim aktiviteleri dahil olmak üzere çeşitli morfolojik ve fizyolojik parametreler açısından karakterize etmektir. Ayrıca ısı şoku proteinlerindeki ekspresyon değişiklikleri kantitatif ters transkripsiyon polimeraz zincir reaksiyonu (RTqPCR) ve western blot (WB) analizleri ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, kuraklığa toleransın moleküler temeline ilişkin anlayışımızı geliştirebilir ve mısırdaki ileriye dönük bir ıslah programları için kullanılabilir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Mısır dahil birçok bitki türünün farklı kuraklık tolerans mekanizmalarının olduğu, kuraklığa hassas ve dayanıklı genotiplerin gen ifadelerindeki farklılıklar ve bunlar arasındaki ilişki büyük ölçüde bilinmemekte ve halen araştırmalara konu olmaktadır. Aşağıda mısır bitkisinin kuraklığa tolerans mekanizmaları ile ilgili yapılan bazı çalışmalar özetlenmiştir.

### 2.1. Morfolojik ve Fizyolojik Özellikler

Kuraklık toleransı, bitkilerin kuraklık koşullarına rağmen büyüebilme ve nispeten yüksek verimler üretebilme kapasitesidir. Bu tolerans, tek bir nesilde geçici bir uyum veya birçok nesil boyunca kalıcı bir adaptasyon olabilir. Hücresel ve çeşitli moleküler, biyokimyasal ve fizyolojik süreçler stresin hafifletilmesinde, cevap mekanizması olarak rol almaktadır. Kuraklık stresi altında yatan tolerans mekanizmalarının fenotipik görünümü ve gen ifadelerinin verim parametrelerine etkisi araştırılmıştır. Kuraklık stresine karşı ilk verilen tepki büyümenin durmasıdır. Sürgün büyümesinin inhibasyonu, bitkilerin metabolik isteklerini azaltır ve osmotik ayarlama için gerekli koruyucu bileşiklerin sentezi için metabolitlerin mobilize edilmesini sağlar. Kök büyümesinin durması ise, kök meristeminin fonksiyonel kalmasını sağlayıp stress koşulları normale dönerken hızlı kök büyümesini teşvik eder (Hsaio ve Xu, 2000). Yanal kök inhibasyonu birincil kökün büyümesini sağlayıp toprağın daha alt katmanlarından suyun çıkarılmasını sağlamaktadır (Xiong vd., 2006). Büyüme inhibasyonu, su kaynaklarının azalmasıyla hücre turgorunun azalması sebebiyle ortaya çıkabilmektedir. Bu durum stomaların kapanmasıyla, hücre iletkenliğinin köklerden yapraklara doğru hidrolik iletkenliğin azalmasıyla oluşmaktadır. Hidrolik iletkenlikteki azalma sürgüne besin geçişini azaltmakla birlikte, ksilemde embolizmi önlemektedir. Osmotik ayarlama ise bitkilerin kuraklıkla başa çıkma yollarından biridir. Poliol ve prolin gibi çözücülerin stres altında sentezi, hücrelerden su kaybını önler ve turgorun korunmasında önemli bir rol oynar (Blum, 2005; DaCosta ve Huang, 2006). Büyüme önceliklerinin değiştirilmesi ve stres kaynağı nedeniyle fotosentetik organların performanslarının azalması, kaynak ve depo dokuları arasındaki karbon dağılımını değiştirmektedir (Roitsch, 1999). Bu nedenle normal kuşullarda büyümeyi katkı sağlayan karbonhidratlar, stres altında köklerin stresle savaşıma uygun şekilde büyümesi veya osmotik ayarlama için çözücülerin sentezi için kullanılabilir. Kuraklık stresi altında artan absisik asit sentezi, stomaların

kapanmasına neden olup, hücreler arası karbondioksit konsantrasyonunun azalmasına ve fotosentezin inhibe edilmesine yol açmaktadır. Bu durum stres koşulları ortadan kalktığında normale dönerek fotosentez yeniden başlamaktadır (Chaves vd., 2009). Diğer taraftan, kuraklık koşullarında açık stomalar ve yüksek hidrolik iletkenlik, turgor kaybı riskine rağmen fotosentezi ve sürgünlere besin tedarikini sağlamaktadır (Sade vd., 2012). Devam eden fotosentetik ışık reaksiyonları sırasında uzun süreli stomal kapanma nedeniyle karbondioksit kısıtlaması, indirgenmiş fotosentetik elektron taşıma bileşenlerinin birikmesine yol açar. Bu bileşenler moleküler oksijeni indirger ve reaktif oksijen türlerinin oluşmasına neden olur. Buda fotosentetik mekanizmalarda hasara yol açmaktadır. Fotosentezin bu metabolik inhibisyonu geri dönüşümsüzdür ve hasara neden olmaktadır (Lawlor ve Cornic, 2002). Sonuç olarak, fotofosforilasyon ve ATP üretimi azalır, bu da Rubisco aktivitesini inhibe eder. Diğer yandan, su kıtlığı durumunda artan solunum hızı da gözlemlenmiş olup, bu durum yapraklarda hücreler arası CO<sub>2</sub> seviyelerinin artmasına neden olur (Lawlor ve Tezara, 2009). Daha yüksek solunum, oksidatif fosforilasyondan bağımsız olarak solunumla oksijen üretiminin artması sonucu meydana gelebilir, bu da indirgen maddelerin birikimini önler ve reaktif oksijen türlerinin oluşumunu azaltır. Artan solunum hızı, kuraklık koşullarında meydana gelen osmolit sentezi ve antioksidan metabolizması gibi enerji yoğun süreçlerin aktivasyonu nedeniyle de gözlemlenmektedir. Kloroplastlar ve mitokondrilerdeki metabolik süreçlerin birbirine bağımlılığı rapor edilmiştir (Raghavendra ve Padmasree, 2003). Mitokondriyal solunum, fotosentetik ışık reaksiyonları sırasında üretilen NADPH'nin matris tarafında bulunan tip II NADPH dehidrojenazlar aracılığıyla dağıtılmasında önemli bir rol oynar (Plaxton ve Podesta, 2006). Bu nedenle, yaprak mitokondrileri, su stresi altında kloroplast metabolizmasındaki değişikliklerle başa çıkabilen bir güvenlik motoru olarak işlev görür (Atkin ve Macherel, 2009). Bitki mitokondrileri ayrıca alternatif oksidaz yolunu kullanarak kendi içlerinde reaktif oksijen türlerinin oluşumunu önler; bu yol, solunumla elektron taşıma sisteminin kompleks III ve IV'ünün atlanmasını sağlar ve elektronlar doğrudan oksijene aktarılır, bu işlem sırasında ATP yerine termal enerji üretilir (Siedow ve Umbach, 2000).

Kuraklık, en önemlisi fotosentez olmak üzere metabolik süreci önemli ölçüde etkilemektedir (Kalaji vd., 2016, Liu vd., 2018). Yüksek klorofil seviyeleri bitkilerde stres direnciyle ilişkilidir (Khayatnezhad ve Gholamin, 2012). Klorofil içeriğini etkileyen faktörlerden ışık yoğunluğu, sıcaklık, yaprak yaşı ve klorofil sentezinde su hayati öneme

sahiptir (Rahneshan vd., 2018). Şiddetli yağmurların ardından klorofil içeriği artar, ancak kurak dönemde değeri düşer. Ayrıca suya doymuş toprak durumunda yaprakların klorofil içeriği azalır. Maksimum klorofil içeriğini korumak, yüksek su içeriği gerektirir (Khayatnezhad ve Gholamin, 2012). Çevresel stres altında yeşil bitkilerde hassas çeşit yapraklarında klorofil içeriği azalırken dayanıklı çeşidin yapraklarında artar. Dayanıklı çeşidin yaprakları, duyarlı çeşidin yaprak rengine göre daha koyu yeşildir. Soğuğa duyarlı çeşitlerde hızlı klorofil kaybı fotosentetik aktivitenin azalmasına neden olur. Çeşitli çevresel faktörler bitkide kloroz veya sararmaya neden olur. Araştırmacılar yüksek klorofil içeriğinin, kuraklık toleransına olumlu katkı sağladığını bildirmekle beraber klorofil içeriği yüksek çeşitlerin seçilerek ıslah çalışmalarında kullanılmasının önemini vurgulamışlardır (Khayatnezhad ve Gholamin, 2012).

Bitki yaprakları, fotosentez ve terleme gibi hayati fonksiyonlar için kritik öneme sahiptir (Knight ve Ackerly, 2003). Yaprakların morfolojik ve fizyolojik adaptasyonları, abiyotik streslere karşı bitkilerin sınırlı kaynakları (fotosentetik aktif radyasyon, besinler ve toprak suyu gibi) etkin bir şekilde elde etmesi ve kullanması açısından önemlidir. Spesifik yaprak alanı, yaprak alanının kuru kütleye oranı olarak tanımlanır (Garnier vd., 2001; Poorter vd., 2009) ve önemli bir yaprak özelliği olarak kabul edilir (Wilson vd., 1999; White ve Scott, 2006; Hulshof vd., 2013). Spesifik yaprak alanı, su kullanım stratejisi veya hayatta kalma stratejisiyle yakından bağlantılı olup, bitkilerin kuraklık koşullarındaki performansını değerlendirmek için sıklıkla kullanılmaktadır (Thomas, 2010; Boucher vd., 2017). Mısır bitkisinin spesifik yaprak alanının hem yağışa dayalı yetiştirme koşullarında hem de kuraklık koşulları altında azaldığı belirlenmiştir. Üç yapraklı aşamada ve yedi yapraklı aşamada başlayan farklı su stresi yoğunlukları, yaprak alanında önemli bir farklılık göstermezken spesifik yaprak alanı ve yaprak kuru kütlesinde önemli düşüşlere neden olmuştur. Yaprak alanının ölçeklendirilmesini önemli ölçüde etkileyen faktör, su stresinin yoğunluğundan ziyade ortaya çıkma zamanıdır. Yaprak alanının dinamik özelliklerini şekillendirmede toprak suyu ve sıcaklık koşulları arasında bir denge mekanizması olduğu bildirilmiştir. Yaprak alanının sıcaklık artışıyla azaldığını, su açığı olup olmadığına bakılmaksızın ve yaprak alanının bitki büyüme mevsimi boyunca su ve sıcaklık koşulları arasındaki denge tarafından düzenlendiğini göstermektedir (Zhou vd., 2020).

Mısırdaki kuraklık stresinin etkilerinin anlaşılması için, farklı kuraklık stresi seviyelerinde denemeye alınan üç mısır çeşidinin kurak koşullarda büyüme ve gelişmeleri yavaşlamış, taze ve kuru ağırlıklarında azalma, strese maruz kalan bitki yapraklarındaki bağıl su içeriğinde azalma, klorofil ve karotenoid içeriğinde azalma görülmüştür. Ayrıca kurak koşullarda antosiyanin ve prolin içeriğinde artış görülmüştür. Antosiyanin ve prolin hariç incelenen tüm parametrelerin deneme kontrol koşullarına getirildiğinde iyileştiği bildirilmiştir (Efeoğlu vd., 2008).

Mısır genotiplerinde genetik parametrelerin tahmini ve karakterler arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amacıyla yürütülen bir çalışmada; en yüksek genotipik varyasyon katsayısı taze kök uzunluğu için bulunmuş, en yüksek kalıtım değeri klorofil içeriği için belirlenmiş ve varyasyon katsayısı analizi, taze kök uzunluğunun, taze sürgün uzunluğu üzerinde en büyük doğrudan etkiye sahip olduğunu, bunu kuru kök ağırlığı, kök yoğunluğu, yaprak sıcaklığı ve kuru sürgün ağırlığının izlediğini göstermiştir. Sonuç olarak, taze kök uzunluğu, kuru kök ağırlığı, kök yoğunluğu, yaprak sıcaklığı ve kuru sürgün ağırlığı, mısır fidelerinin taze sürgün uzunluğuna büyük ölçüde katkıda bulunan özellikler olduğunu belirtmişlerdir (Ali vd., 2011).

Başka bir çalışmada, üç mısır çeşidinin (FR13, FRB73, TTM815) kuraklık stresine toleranslarının araştırılması amacıyla bazı morfolojik ve fizyolojik parametreler analiz edilmiştir. Yirmi bir günlük bitkilere, Hoagland besin çözeltisi uygulaması sonlandırılarak 2 (hafif kuraklık stresi), 5 (orta dereceli kuraklık stresi) ve 8 (şiddetli kuraklık stresi) gün olmak üzere üç farklı kuraklık rejimi uygulanmıştır. FR13 ve TTM815 çeşitlerinde orta dereceli ve şiddetli kuraklık stresi kök büyümesini önemli derecede inhibe ederken, gövde büyümesi mısır kültürlerinde tüm kuraklık uygulamalarından etkilenmemiştir. Elde edilen sonuçlar mısır çeşitlerinde hafif ve orta dereceli kuraklık stresi koşullarında toplam bitki boyundaki azalmanın, kök büyümesindeki inhibisyonla kaynaklandığını ancak FRB73'ün daha az etkilendiğini göstermiştir. Tüm çeşitlerde kuraklık uygulamaları taze ve kuru biyomasın artmasına neden olmuş fakat FRB73'de daha belirgin bir artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlar kuraklık koşulları altında nispeten daha stabil su miktarına sahip olduğu için FRB73'deki su ilişkilerinin daha uygun şekilde regüle edildiğini göstermektedir. FR13 ve TTM815'de "klorofil a" miktarı uygulamalar sonunda azalırken, FRB73'de kuraklık stresinden etkilenmemiştir. Diğer yandan FR13 ve FRB73'de "klorofil b" içeriği kuraklık

uygulamalarından daha az etkilenmiştir. Kuraklık uygulamaları sonucunda tüm çeşitlerdeki malondialdehit birikimi önemli derecede artmış ancak FRB73’de daha az birikim belirlenmiştir. Toplam fenolik madde içeriği tüm kùltivarlarda özellikle orta dereceli ve şiddetli kuraklık sonucunda artmıştır. FR13 ve TTM815’de toplam çözünür şeker miktarı orta dereceli ve şiddetli kuraklık uygulamaları sonucu azalırken, FRB73’de değişmemiştir. Elde edilen sonuçlara göre FRB73’ün, FR13 ve TTM815 ile 50 karşılaştırıldığında, kuraklık stresi altında kök ve gövde büyümesini sürdürme yeteneği, fenolik madde, taze ve kuru biyomas artışı, su, fotosentetik pigment (klorofil a ve b) ve şeker miktarının daha az etkilenmesi ve malondialdehit birikiminin daha az olması nedeniyle kuraklığa daha toleranslı bir mısır kùltivarı olduğu söylenebilir (Doğru ve Bayram, 2016).

Mısırdaki erken büyüme aşamalarında meydana gelen su stresi fenotipi, üreme sistemini ve tohum oluşumunu önemli ölçüde etkiler. Su stresi koşullarında verim kaybı stresin derecesine ve süresine bağlı olarak %30-90 arasında değişmektedir. Mısırın su stresine duyarlı olduğu aşamalar vegetatif, çiçeklenme ve tane doldurma aşamalarıdır. Bu aşamalarda verim kaybı sırasıyla %25, %50 ve %21 kadar olabilir. Su stresi altında fenotipik ifadenin karşılaştırılması için 7 farklı seviyede uygulanan su stresi koşullarında mısır hatlarının performansını belirlemek için yapılan bir çalışmada, çiçeklenme ve tane doldurma aşamalarında su stresine maruz kalan bitkilerin fenolojik ve verim özelliklerinin ciddi anlamda olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Su kılığına dayanıklı genotipler ile dayanıksız genotipler arasında yapılan karşılaştırma sonuçları arzu edilen sınırın altında olsa da bazı özellikler bakımından dayanıklı genotipler stres altında daha yüksek ortalamalar göstermiştir. Çiçeklenme ve tane doldurma aşamalarında dayanıksız hatlar dayanıklı hatlara göre önemli ölçüde verim kaybı göstermiştir. Araştırmacılar kuraklık toleransının artırılması için belirlenen özellikleri yaprak sayısı, sap uzunluğu, yaprak alanı, boğum arası uzunluğu, yaprak uzunluğu, yaprak genişliği, koçan tane oranı, yaprak sararması, bitki yüksekliği, kök kuru ağırlığı ve kök uzunluğu olarak sıralamışlardır (Sah vd., 2020).

Bitki fotosentezi, yaprak su içeriği ile yakından ilişkilidir ve bitki fotosentezindeki kritik noktalarda yaprak su içeriği koşullarının netleştirilmesi, kuraklığı doğru bir şekilde izlemek ve erken kuraklık uyarıları sağlamak için büyük teorik ve pratik değere sahiptir. Genel olarak, hafif ve orta dereceli kuraklık stresi altında azalan fotosentezin ana nedeni stomatal sınırlamadır. Şiddetli kuraklık stresinde, bitkinin fotosentetik organları tahrip olur

ve stomatal olmayan sınırlama bitkinin fotosentetik kapasitesini azaltır. Bitki fotosentezinin stomatal sınırlamadan, stomatal olmayan sınırlamaya geçişi, hafif ve orta dereceli kuraklık stresinden şiddetli kuraklık stresine geçiş için önemli bir dönüm noktasıdır. Farklı şiddetlerdeki kuraklık stresinden sonra yeniden sulama yapıldığında yaprak su içeriğinin geri kazanıldığını, ancak tepe püskülü çıkarma evresi ve tane doldurma evresinde sırasıyla 43 gün ve 36 gün süren kuraklık stresinden sonra yeniden sulama yapıldığında geri kazanılmadığını göstermektedir. Generatif aşamalarda meydana gelen kuraklığın yaprak su kapsamı üzerinde ciddi etkileri olduğu belirtilmiştir. Yaprak su kapsamının %77,2 olması mısırın fotosentetik kapasitesinin tamamen geri kazanılması için gerekli olan kritik su koşuludur. Kuraklık dönemleri, mısırın kuraklık direncini artırmış; ancak, uygun yaprak su kapsamı aralığını azaltmış ve fotosentetik kapasitesini önemli ölçüde zayıflatmıştır (Song vd., 2021)

Kuraklık stresi altındaki potansiyel genotiplerin tanımlanması, genetik modifikasyonlar için esastır. Mısırdaki kuraklık şartlarında hatların genetik olarak karşılaştırılması yapılan bir çalışmada, potansiyel genotiplerin fide ve olgunluk aşamasında genotipik karşılaştırmaları yapılmıştır. Üç farklı sulama koşulunda A-521-1, M-14, A239 ve OH-8 hatları daha iyi performans göstermiştir. Taze fide döneminde kök ağırlığı, taze sürgün ağırlığı, kuru kök ağırlığı, kuru sürgün ağırlığı ve kök yoğunluğu maksimum kalıtsallık gösterirken, kök ve sürgün uzunluğu, klorofil içeriği en yüksek genetik ilerlemeyi sağlamıştır. Olgunluk aşamasında ise bitki başına verim, yaprak alanı ve bitki boyu daha yüksek genetik ilerlemeye neden olurken, koçan çapı, bitki boyu ve koçan başına tohum verimi üzerine maksimum iyimser infians göstermiştir. Dolayısıyla performansı iyi olan hatların gelecek nesiller için iyi bir ıslah materyali olacağı savunulmuştur (Shahzad vd., 2023).

## 2.2. Enzimatik ve Moleküler Özellikler

Bitki strese maruz kaldığında, AOX yolu ve fotorespiratuvar yol aktif hale gelir ve hücre işlevini koruyarak ROT birikimini önlemede rol oynar (Lambers vd., 2005, Florez-Sarasa vd., 2007). Ayrıca, aşırı indirgenmiş maddelerin oluşumunu önlemek için TCA döngüsü modifiye edilir. Bu modifikasyonlardan biri, TCA döngüsünde indirgenmiş güç üretimiyle ilgili iki adımın atlandığı GABA sentezidir. GABA birikimi stres koşullarında

gerçekleşir ve bir stres uyum yanıtı oluşturabilir (Fait vd., 2007). Prohibitler, iç mitokondriyal membranda yer alan büyük protein kompleksleridir ve iç mitokondriyal membranın süper yapısını ve buna bağlı protein komplekslerini korumada rol oynar (Van Aken vd., 2010). Prohibitlerin stres toleransında rol oynadığı düşünülmektedir; bu, sadece mitokondriyal yapıyı korumalarından değil, aynı zamanda stres yanıtı olarak mitokondri ve çekirdek arasında retrograd sinyalleme tetiklemelerinden kaynaklanır. Bu sinyalleme, AOX, ısı şok proteinleri ve hormon homeostazıyla ilgili genler de dahil olmak üzere çeşitli stres yanıtı transkriptlerinin ifadesini değiştirir. Reaktif oksijen türleri, hücrelerin metabolik olarak bozulması sonucu oluşur ve hücre hasarına ve ölümüne neden olmaktadır. ROT oluşumunun önleme mekanizmalarının yanında, önemli bir uyum mekanizması da bunların temizlenmesidir. Askorbat, alfa-tokoferol ve karotenoidler gibi antioksidan substratlar ile süperoksit dismutaz, katalaz, askorbat peroksidaz ve glutatyon redüktaz gibi antioksidan enzimler hücre organellerinde ve sitoplazmada bulunur ve bu reaktif türlerin detoksifikasyonunda önemli bir rol oynar (Shao vd., 2008). Metiyonin sülfonoksit redüktazlar, plastidlerde ROT oluşumuna bağlı olarak protein hasarını önlemede rol oynayan bir diğer antioksidan enzim sınıfıdır (Rouhier vd., 2006). Bitki hormonları, bitkilerin strese uyum sağlamasına olanak tanıyan çeşitli süreçleri düzenler. Kuraklık altında köklerde salgılanan ABA yapraklara taşınarak burada stomaların kapanmasını sağladığı ve bitki büyümesini engellediği bilinmektedir (Wilkinson ve Davies, 2010). ABA'nın, bitkinin su dengesini korumaya katkıda bulunan akvaporin aktivitesini düzenlemedeki rolü de bildirilmiştir (Parent vd. 2009). Absisik asit biyosentezinde önemli bir enzim olan 9-cis-epoksikarotenoid dioksigenazın (NCED3) *Arabidopsis*'te aşırı ifade edilmesiyle, kuraklık altında sürgün büyümesinde iyileşme gözlenmiştir (Iuchi vd., 2001). Kuraklık toleransının ifadesi sırasında ABA birikiminin, etilen üretiminde azalmaya ve etilen kaynaklı yaşlanma ve dökülmenin inhibisyonuna neden olduğu bilinmektedir. ABA eksikliği olan mısır fidelerinde kuraklığa duyarlılık ve etilen üretiminde artış görülmüştür (Sharp, 2002). Oksinler, kuraklık toleransının negatif düzenleyicileri olarak tanımlanmıştır (Xie vd., 2003). IAA'nın aşağı regülasyonunun, LEA mRNA birikimini kolaylaştırdığı ve kuraklık stresine adaptasyona yol açtığı görülmüştür (Zhang vd., 2009). Bununla birlikte, mısır yapraklarında su stresine maruz kalmanın ilk aşamalarında IAA içeriğinde geçici bir artış olduğuna, daha sonra bitki su stresine uyum sağladıkça hızla düştüğüne dair kanıtlar vardır (Wang vd., 2008). Su stresine maruz kalan mısır yapraklarında endojen zeatin ve gibberellin seviyelerinde hızlı bir düşüş gözlenmiş ve bu durum, daha yüksek hücre hasarı seviyeleri ve

bitki büyümesinin inhibisyonu ile ilişkilendirilmiştir. Kuraklık stresine maruz kalan bitkilerde azalan biyosentez veya artan yıkım nedeniyle azalmış sitokinin içeriği ve aktivitesi gözlenmiştir (Pospisilova vd., 2000). Sitokininlerin yaşlanmayı geciktirdiği bilinir ve sitokinin biyosentezine dahil olan ipt geninin aşırı ekspresyonu yoluyla endojen sitokinin seviyelerindeki artış, kuraklık kaynaklı yaşlanmayı geciktirerek stres adaptasyonunu sağlamıştır (Peleg ve Blumwald, 2011). Sitokininler ayrıca kök büyümesinin ve dallanmasının negatif düzenleyicileridir ve köke özgü sitokinin yıkımı, birincil kök büyümesine ve dallanmasına katkıda bulunmuş ve bu da *Arabidopsis*'te kuraklık toleransını artırmıştır (Werner vd., 2010). Brassinosteroidlerin (BR'ler) de bitkileri çeşitli abiyotik streslere karşı koruduğu bildirilmiştir (Kagale vd., 2007). BR uygulamasının, su alımını ve membran stabilitesini artırdığı, ayrıca kuraklık stresine maruz kalan buğday bitkilerinde membran hasarından kaynaklanan iyon sızmasını azalttığı görülmüştür (Sairam, 1994). Reaktif oksijen türleri (ROT), özellikle kuraklık ve sıcaklığa maruz kalan bitkilerde hızla birikebilir ve proteinler, DNA ve lipidlere oksidatif hasara neden olabilir (Apel ve Hirt, 2004). ABA, geniş bir abiyotik stres yelpazesi altında bitkilerde yaygın olarak bulunan bir ikinci haberci olabilir. Stres kaynaklı endojen ABA birikiminin,  $H_2O_2$  üretimini teşvik ederek ROT temizleyici enzimlerin aktivitelerini artırdığı ve bitkilerin kuraklık ve sıcaklık stresine karşı toleransını güçlendirdiği kanıtları bulunmaktadır (Gong vd., 1998; Larkindale ve Knight, 2002; Hu vd., 2008). HSP70, ökaryotik hücrelerde çeşitli görevlerde yer alan şaperon moleküllerinin önemli sınıfından biridir. Hayvan hücrelerinde, araştırma sonuçları  $H_2O_2$ 'nin HSP70 ifadesini indükleyebileceğini (Courgeon vd., 1988; Yan vd., 2002; Guo vd., 2007) ve bu da glutasyon peroksidaz (GPx), GR (Guo vd., 2007), CAT (Volm vd., 1995) ve SOD (Zhang vd., 2008) aktivitelerini önemli ölçüde artırarak  $H_2O_2$  birikimini temizlemeye yardımcı olduğunu göstermektedir. Bitkilerde,  $H_2O_2$  birikimi de HSP'lerin birikimine neden olur (Dat vd., 2000; Mittler, 2002), özellikle HSP70, ABA tedavisi (Cho ve Hong, 2006), kuraklık stresi, ısı şoku ve bunların kombinasyonu (Oono vd., 2003; Rizhsky vd., 2002, 2004; Cho ve Choi, 2009) tarafından hızlı bir şekilde indüklenir. Artan HSP70 sentezi, belirgin bir stres toleransı ve sitoproteksiyon artışına yol açar. HSP70'nin aşırı ifade edilen transgenik tütün fideleri, kuraklık ve sıcaklık stresine dayanıklılık gösterir (Cho ve Choi, 2009). Ancak, ABA ve HSP70'nin, kombinasyonlu kuraklık ve sıcak stres altında bitkilerde ROT kaynaklı sitotoksositeye karşı koruma sağlamada ne ölçüde ve nasıl işbirliği yaptığı belirsizdir. Mısırdaki kuraklık ve sıcaklık stresi ve birlikte görüldüğü koşullarda, mısırın kuraklık ve sıcak stres kombinasyonuna olan tepkisinde HSP70 ile ABA arasındaki

etkileşimi incelenmiştir. Mısırın yaprakları ve köklerinde HSP70, ABA,  $H_2O_2$  ve antioksidan enzimler arasındaki ilişkiyi (CAT, SOD, APX ve GR), mısırın ABA eksikliği gösteren mutant vp5, ABA sentezi inhibitörü T (tungstat),  $H_2O_2$  temizleyici I (KI) ve P (Na-Piruvat) ile ve HSP70 inhibitörü KNK437 (N-formil-3, 4-metilendioksi-benziliden-g-bütirolaktam) ve Q (quercetin) kullanılarak incelenen mısır bitkilerinde 4 saatlik stres uygulamaları yapraklarda belirgin bir  $H_2O_2$  birikimine neden olmuştur. Araştırmacılar, kuraklık ve sıcaklık stresinin birlikte en güçlü etkiyi gösterdiğini bildirmişler, onu sırasıyla sıcak ve kuraklık stresi etkilemiştir. Ancak köklerde stres türüne göre veya birlikte etki arasında belirli fark görülmediği bildirilmiştir. ABA inhibitörü T ile yapılan ön işlem yaprak ve köklerde  $H_2O_2$  birikimini önemli ölçüde engellemesine karşın HSP70 inhibitörü Q ile yapılan ön işlem, yapraklarda  $H_2O_2$  birikimini çok az bir şekilde arttırdığı bildirilmiştir. Dolayısıyla ABA ve HSP70, mısır fidelerinde  $H_2O_2$  birikimini etkilemekte olduğu sonucuna varmışlardır. HSP70 ifadesine değinilecek olursa; stres koşullarına maruz kalan mısır fidelerinde yapraklarda ve köklerde HSP70 ifadesinde artış görülmüştür. Ancak  $H_2O_2$  temizleyici I ve P, ABA inhibitörü T, kuraklık, sıcaklık ve kuraklık ve sıcaklık stresinin kombinasyonu tarafından indüklenen HSP70 sentezini yapraklarda ve köklerde olmak üzere engellemiştir. Antioksidan enzim aktivitelerinde görülen değişimler ise; SOD, APX ve GR aktiviteleri, mısır yapraklarında ve köklerinde üç stres altında arttığı, ancak ısı ve kuraklık kombinasyonu tarafından uyarılan SOD, APX ve GR (köklerde hariç) aktiviteleri, PEG stresinden belirgin şekilde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Yapraklarda, PEG uygulaması CAT aktivitesini büyük ölçüde arttırırken, ısı ve PEG stresi ile ısı şoku, CAT aktivitesi üzerinde az etkili olduğu, köklerde, ısı veya PEG stresi ve ısı şokunun kombinasyonu tarafından uyarılan CAT aktivitelerindeki artışın, yalnızca PEG tarafından uyarılan artıştan daha yüksek olduğu da tespit edilmiştir. Ayrıca, PEG ve ısı stresi kombinasyonu tarafından uyarılan APX aktivitesindeki artış, yapraklarda veya köklerde ısı tarafından uyarılan artıştan daha yüksek bulunmuştur. Tüm durumlarda,  $H_2O_2$  temizleyici I ve P ön uygulaması, antioksidan enzim aktivitelerinin artışını yapraklarda ve köklerde büyük ölçüde engellerken, HSP70 inhibitörleri K ve Q ile yapılan ön işlem, yaprak SOD, CAT, APX ve GR aktivitelerindeki artışı, kök SOD, CAT, APX ve GR aktivitelerindeki artışı engellediği bildirilmiştir. Ayrıca, ABA sentez inhibitörü T ile yapılan ön işlem, mısır yaprakları ve köklerindeki SOD, CAT, APX ve GR'nin stres kaynaklı aktivitelerindeki artışı önemli ölçüde engellediği de bulunmuştur. Sonuç olarak, PEG, sıcaklık ve bunların kombinasyon stresine maruz kalan mısır fidelerinde HSP70 ekspresyonu ile  $H_2O_2$  birikimi arasında bir

ilişki olduğu rapor edilmiştir.  $H_2O_2$ , HSP70 sentezini teşvik eder, bu da antioksidan enzimlerin aktivitelerini artırır ve  $H_2O_2$  birikimini bastırır. Diğer taraftan, HSP70 ekspresyonundaki azalma  $H_2O_2$  üretimini artırabilir, bu da artan bitki toleransını sağlayan bireysel enzimlerle etkileşimi gösterir. Bu sonuçlar, ROT tarafından uyarılan HSP70'in bitkilerde denatüre proteinlerin bertarafında rol oynadığını göstermektedir. PEG ve sıcaklık stresinin bir arada uygulandığı durumda, mısır yapraklarında HSP70 ve  $H_2O_2$  artışının, yalnızca sıcaklık veya yalnızca PEG altında olanlardan daha yüksek olduğu, ancak bu üç stres uygulaması altındaki artışın köklerde benzer olduğu bulunmuştur. Ayrıca, yapraklarda köklere göre, sıcaklık stresi tarafından PEG'den daha fazla HSP70 ve  $H_2O_2$  indüklendiği, yapraklarda APX'in artışının, kombinasyon stresi tarafından yalnızca sıcaklık tarafından indüklenenlerden biraz daha fazla olduğu, kökler veya yapraklarda, SOD, APX ve CAT aktivitelerindeki artışların ise PEG tarafından olduğundan daha fazla olduğu da araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Hu vd., 2010).

Mısırda, su stresinin önemli bir etkisi, püskül çıkarma sürecinin gecikmesine neden olarak ASI'nin (çiçek açma-püskül çıkarma aralığı) artmasına yol açar; bu da verim kayıplarının önemli bir sebebidir. Kuraklık toleransı sağlayan faktörlerin bulunduğu kromozomal bölgeleri belirlemek ve bu bölgeleri çiçeklenme bileşenlerini ve bitki boyunu kontrol eden niceliksel özellik lokusları (QTL'ler) ile karşılaştırarak mısırın su stresine tepkisinin genetik ve fizyolojik temeli hakkında dolaylı bilgi edinmek amacıyla, bitki gelişimi ve çiçeklenme ile ilgili özellikler ve moleküler markörler arasındaki bağlantı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda erkek ve dişi çiçeklenme zamanı, anter-püskül aralığı (ASI), bitki boyu ve moleküler markörler arasında bir bağlantı analizi gerçekleştiren araştırmacılar, B73 ve H99 hatlarının F1 döllerinin kendileştirilmesiyle elde edilen 142 rekombinant inbred hattından oluşan bir mısır popülasyonu üzerinde, iyi sulanmış ve su stresi altında olmak üzere iki çevresel koşulda yaptıkları denemede, toplamda 153 lokus için RFLP, mikrosatellitler (SSR) ve AFLP markörleri ile genotipleme gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bağlantı analizi, erkek çiçeklenme zamanı ve bitki boyu için tespit edilen QTL'lerin çoğunun kontrol ve stres koşulları altında aynı olduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık, dişi çiçeklenme zamanı ve ASI ile ilgili olarak, kontrol koşulları veya stres altında ifade edilen farklı QTL'ler ortaya çıkmıştır. Kuraklığa tolerans sağlayan tüm QTL'ler, karakteri kontrol eden faktörlerin harita konumuna kıyasla farklı bir kromozom pozisyonunda yer almıştır. Bu durum, bitki toleransının, karakteri kontrol eden elverişli

allelizm kombinasyonlarının varlığına değil, karakterin kontrolüyle doğrudan ilişkili olmayan fizyolojik özelliklere dayandığını göstermektedir (Sari-Gorla vd., 1999).

Kuraklık stresi, ABA konsantrasyonunun artışı, ksilem pH'ının ve iletkenliğinin azalması gibi sorunlara yol açmaktadır. Stres koşullarında reaktif oksijen türleri (süperoksit radikalleri, singlet oksijen, hidrojen peroksit ve hidroksil radikalleri) yüksek miktarda üretilmektedir. Hidrojen peroksit ve süperoksit radikalleri nispeten reaktif olmamalarına rağmen, hidroksil radikaller oluşturabilirler ki bunlar proteinlere, lipitlere ve DNA'ya zarar verebilir. Lipit peroksidasyonu, oksidatif stresin bir göstergesi olarak yaygın bir şekilde kabul edilir ve bitki hücre zarının bütünlüğünü bozar. Bu, temel çözücülerin organellerden ve hücreden sızmasına ve zar fonksiyonunun bozulmasına ve metabolik dengesizliklere neden olur. Bitkilerde ROT üretimi için kloroplastlar, mitokondriler ve peroksisomlar gibi birçok potansiyel yer vardır. Bitkiler, reaktif moleküllerin aşırı üretimini önlemek için hücrenel redoks durumunu kontrol eden antioksidan sistemlerini evrimleştirmiştir. Osmotik ayarlama da kuraklık kaçınma mekanizmalarının bir parçasıdır. Prolin ve kuaterner amonyum bileşikleri, hücre turgorunu korumaya yardımcı olan anahtar osmolitlerdir. Ayrıca, bu uyumlu çözücülerin bitkilerde yüksek konsantrasyonlarda birikerek enzimlerin inaktivasyonunu veya su eksikliği nedeniyle zar bütünlüğünün kaybını hafifletmeye yardımcı olduğuna dair ek kanıtlar vardır. Şeker ailesinin bir üyesi olarak sükröz, hücrenel zarları stabilize eden ve turgoru koruyan tipik bir osmoprotektan olarak işlev gördüğü düşünülmektedir. Araştırmacılar kuraklığa duyarlı ve kuraklık dayanımı yüksek iki mısır çeşidinde, osmotik stresin ve çözücü bileşiklerin ilişkisini ve membran özellikleri ile bitki su içeriği ilişkisi incelemiştir. Lipit peroksidasyonu, elektrolit sızıntısı, prolin içeriği, çözünebilir şeker içeriği gibi parametreler incelendiğinde kuraklığa dayanımı yüksek çeşitte dayanım yönünde artış veya azalma görülmüştür (Valentović vd., 2006).

Kuraklık stresi tarımsal üretimi etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bitkilerin bu koşullara uyum sağlama yeteneği, dünya çapında tarımsal üretim için hayati öneme sahip olmaktadır. Su kaynaklarının azalması nedeniyle suyu etkin kullanan çeşitlerin geliştirilmesi veya kuraklığa dayanımı yüksek çeşitlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu sebeple araştırmacılar kuraklık direncinin altında yatan moleküler mekanizmayı ve genetik faktörleri anlamaya çalışmışlardır. Mısır genotiplerinin kuraklık stresine karşı direnç potansiyelinin genetik ve moleküler doğasının anlaşılması, yüksek

kuraklık toleransına sahip mısır hibritlerinin oluşturulmasında yeni fırsatlar sunacağı belirtilmiştir. Kuraklık stresi durumunda 73 – 212 adet arasında farklı şekilde ifade edilen gen tespit edilmiştir. Bu genler 2 grupta sınıflandırılmıştır: İlk grupta, kuraklık stres koşullarında işlev gören fonksiyonel proteinleri içermektedir. Enerji metabolizmasında rol oynayan proteinler (ATP sentaz, delta 1-pirrolin-5-karboksilat sentaz, beta-ketoasil-CoA sentaz, alkalin alfa galaktozidaz 1), ısı şoku proteinleri (HSP 17.2, HSP 101), detoksifikasyon enzimleri (Serin/treonin-protein kinaz SAPK4), proteazlar, şeker taşıyıcılar, şeker sentez enzimleri vb. yer almaktadır. Isı şoku proteinleri, makromoleküllerin korunmasında aktif rol oynar. Şekerler, hücre bileşenlerini dehidrasyondan koruyan osmoprotektantlar olarak işlev görür. İkinci grupta ise, gen ekspresyonunu düzenleyen veya stres sinyal transdüksiyonunda rol oynayan çinko parmak transkripsiyon faktörü, ASF/SF2-benzeri pre-mRNA ekleme faktörü SRP31 vb. düzenleyici proteinleri yer almaktadır. Kuraklık stresi tepkisi ile ilişkilendirilen farklı şekilde ifade edilen genlerin yaklaşık %53'ü, genotipe bağlı olarak ya bilinmeyen bir fonksiyona sahiptir ya da henüz açıklanmamıştır. Rollerini açıklığa kavuşturulduğunda, kuraklık stresine karmaşık bitki tepkisini daha iyi anlamak için yardımcı olabileceği bildirilmiştir (Dumitru, 2008).

Strese uyum sağlama süreci, stresin algılanmasından, stres koşulları altında hayatta kalma şansını artıran morfolojik veya fizyolojik bir yanıtın ortaya çıkmasında rol oynayan çok sayıda genin ekspresyonuna kadar uzanan süreçleri içerir. Kuraklığa dayanıklı sorgum genotiplerinin, kuraklık stresi altında daha yüksek Rubisco seviyelerine sahip oldukları ve bunun, Rubisco proteinini kuraklık kaynaklı hasardan koruduğu düşünülen kloroplast şaperon HSP60'ın daha yüksek transkript seviyeleri ile ilişkili olduğu görülmüştür (Jagtap vd., 1998). Kurağa duyarlı ve kurağa dayanıklı genotiplerdeki gen ekspresyonu farklılıkları gözlemlenmiştir. Genel olarak, stres algılama, sinyal iletimi, hücresel yanıtlarda transkripsiyonel düzenleyici ağlar veya dehidrasyona tolerans yoluyla bitkileri kuraklık stresinden koruyan genlerin, kurağa dayanıklı arpa genotiplerinde yukarı yönlü düzenlendiği, fotosentez gibi birincil metabolik süreçlerle ilgili olanların ise aşağı yönlü düzenlendiği görülmüştür (Guo vd., 2009).

Dayanıklı ve hassas çeşitlerin gen ekspresyonlarındaki farklılıkların ve ilişkilerin incelenmesi kuraklığa toleranslı yeni çeşitlerin geliştirilmesinde daha etkin ıslah programları tasarlanması için önemli bilgiler sağlayacaktır. İki kuraklığa toleranslı ve bir hassas

genotipte bazı fizyolojik parametreler ve gen ekspresyonlarındaki değişimler incelendiği bir araştırmada, fotosentez, stoma iletkenliği, toprak ve yaprak su potansiyelleri deneme boyunca izlenmiştir. Stres uygulamasından sonraki günlerde ve kurtarma sulamasından sonra iki toleranslı tipin daha şiddetli değişimler gösterdiği bildirilmiştir. Kuraklığa adaptasyonun farklı fizyolojik mekanizmalarıyla ilişkisi olan gen ifadesindeki değişimlerin en büyüğü kurtarma sulaması sırasında görülmüştür. Kurtarma sulamasından sonra toleranslı çeşitlerde kuraklıktan sonra daha hızlı ve verimli iyileşmeye olanak tanıyan mekanizmalar harekete geçmektedir. Stres altında ise fotosentez ve transkripsiyon seviyeleri arasında bir korelasyon gözlenmiştir. Transkripsiyon faktörlerinin sayısı, tip ve ekspresyon seviyelerindeki farklılıklar da kuraklık stresi altında tanımlanmıştır. Üç mısır çeşidi arasında iyileşme dayanıklı çeşitlerin hassas olana göre daha fazla kuraklığa karşı gen ifadesi oluşturduğu, daha hızlı ve verimli toparlanmanın görüldüğü bildirilmiştir. Son olarak toleranslı çeşitlerinde kendi aralarında kuraklığa dayanım mekanizmalarında farklılık olduğu çeşide özel dayanım mekanizmasının olduğu bildirilmiştir. Kurağa dayanıklı mısır yerel türlerinde, hormonları, akvaporinleri, HSP'leri, LEA'ları ve detoksifikasyon enzimlerini kodlayan genler, duyarlı yerel türlere göre daha fazla indüklenmiştir (Hayano-Kanashiro vd., 2009).

Kuraklığa tepkinin anlaşılması, kuraklığa toleranslı çeşitlerin geliştirilmesinde ilk adımdır. Bu doğrultuda dehidrasyona karşı iki zıt duyarlılığa sahip mısır genotipi yarı kurak koşullara maruz bırakılmıştır. Hassas genotiplerin bağıl su içeriklerinde biraz azalma görülürken, buna karşılık toleranslı genotipte stomalar açık kalmıştır. Yaprak proteomunda kuraklığa bağlı değişimler benzerdir. Sonuçlar 2D jel elektroforezi ve İTRAQ analizi ile test edilmiştir. Kuraklık stresine karşı koruyucu proteinlerin ve antioksidan enzimlerin görülme oranı duyarlı genotipte daha düşüktür. Hassas genotipte kuraklık stresine aşırı duyarlı olunması sebebiyle stomalar erken kapanır buna bağlı olarak da, fotosentezin inhibasyonuna yol açılır ve ardından kuraklık toleransı ile ilişkili koruyucu/detoksifikasyon proteinlerinin daha az sentezlenmesine sebep olmaktadır (Benesova vd., 2012).

Isı ve kuraklık stresine karşı bitki tepki mekanizmaları, ıslah programlarında stratejik olarak önemlidir. Strese dayanıklı genotip üretimi oldukça sınırlıdır. Yapılan bir çalışmada transkriptom analiz edilmiş ve geliştirilmiştir. OsMYB55 genini aşırı ifade eden mısır bitkilerinin ısı stresine ve kuraklığına toleransı araştırılmıştır. OsMYB55'in mısırdaki aşırı

ekspresyonu, yüksek sıcaklık ve kuraklığın olumsuz etkilerini azalttığı belirtilmiştir (Casaretto vd., 2016).

Kuraklık stresinin, mısır bitkilerinin morfo-fizyolojik ve biyokimyasal davranışı üzerindeki etkileri araştırmacılar tarafından irdelenmiştir. Araştırma sonuçları, kuraklık stresinin bitki boyu, sürgün taze ağırlık, sürgün kuru ağırlık ve tane verimi üzerinde belirgin bir şekilde azaltıcı etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Mısır bitkilerinin yaprak gaz alışverişiyle ilgili veriler, tüm yaprak gaz alışverişi özelliklerinin ilerleyici kuraklık stresi koşullarında önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Kuraklık stresi fotosentez hızı, stomatal etkinlik, hücre içi CO<sub>2</sub> konsantrasyonu, yaprak su içeriği gibi parametreleri önemli düzeyde etkilemiştir. Araştırmacılar, aynı zamanda stres faktörü mısır çeşitlerinde karbonhidrat ve prolin içeriklerinin, SOD, peroksidaz (POD) ve CAT ve GR aktivitesinin arttırdığını bildirmişlerdir (Anjum vd., 2016).

Mısırın belirli fiziksel parametrelerinin sekiz yapraklı aşamada ölçüldüğü bir çalışmada, kuraklık ve yüksek sıcaklığa maruz kalan mısır bitkilerinde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve malondialdehit (MDA) içeriği ve süperoksit dismutaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX) ve glutatyon redüktaz (GR) enzim aktivitelerinde artış görülmüştür. Ancak fotosistem II'nin (8PSII) kuantum etkinliğinde azalma görülmüştür. Ayrıca, üç stres koşulu (kuraklık stresi, yüksek sıcaklık stresi ve kombine stres) tarafından diferansiyel olarak düzenlenen proteinleri tanımlamak için sekiz yapraklı aşamada, mısır yapraklarından elde edilen toplam proteinler tanımlanarak ölçülmüştür. 135, 65 ve 201 proteinlerinin ifade seviyeleri önemli ölçüde değişmiştir. Üç stres koşulunda moleküler şaperonların ifadeleri farklı olduğu bildirilmiştir (Zhao vd., 2016).

Kuraklık nedeniyle oluşan süperoksit anyonları (O<sub>2</sub><sup>-</sup>), singlet oksijen (O<sup>1</sup>), hidroksil radikalleri (OH<sup>-</sup>), hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ve alkoksi radikaller (RO) gibi reaktif oksijen türlerinin üretimi hücre zarlarına zarar verir ve proteinler, lipitler ve nükleik asitlere zarar vererek hücre ölümüne yol açmaktadır. Osmotik ayarlama, bitkilerin osmotik bileşikler sentezlemesiyle hücre yapısı ve işlevleri koruyup, su dengesini sağlayarak ve hücre turgorunu koruyarak su kaybının neden olduğu hasarı geciktirir ve diğer fizyolojik mekanizmaları su yetersizliği koşullarında sürdürür. Aynı zamanda üreme döneminde karbonhidrat dağılımının iyileştirilmesini sağlar dolayısıyla verimi de arttırmaktadır.

Genellikle, prolin birikimi stres koşullarında artar ve bu yalnızca hücre turgorunu korumakla kalmaz, aynı zamanda serbest radikalleri temizler, hücre içi yapıların korunmasına yardımcı olur ve hücrel redoks potansiyelini dengeler. Bitkiler ayrıca ROT kaynaklı oksidatif stresle başa çıkmak için etkili bir antioksidan (enzimatik ve enzimatik olmayan) savunma sistemine sahiptirler (Anjum vd., 2011; Ashraf vd., 2015). Hem enzimatik (APX, SOD, peroksidaz (POD), katalaz (CAT), DHAR ve MDHAR) hem de enzimatik olmayan (AsA, DHA, GSH, GSSG) antioksidanlar, stresli koşullar altında oksidatif hasarı en aza indirirler. Hem enzimatik hem de enzimatik olmayan antioksidanların katkısı, uzun süreli kuraklık stresine maruz kalan bitkilerde stres toleransını sağlayabilir (Sharma vd., 2012). Araştırmacılar ROT birikimi açısından kuraklık kaynaklı oksidatif hasarı ve osmoregülasyon ve/veya enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan savunma sistemlerinin aktivasyonu ile olası korumayı değerlendirmişlerdir. Üç farklı mısır hibridinin (Dong Dan 80, Wan Dan 13 ve Run Nong 35) iyi sulanmış, düşük, orta ve şiddetli kuraklık koşulları altında (sırasıyla tarlanın su tutma kapasitesinin %100, %80, %60 ve %40'ı) denemeye alınan mısır çeşitlerinde, kurak şartlarda oluşan reaktif oksijen türleri oksidatif strese yol açmıştır. Ancak bazı çeşitlerde bulunan kuraklık kaynaklı osmolit birikimi ve güçlü enzimatik ve enzimatik olmayan savunma sistemleri, kuraklık hasarını önlediğini bildirmişlerdir. Dolayısıyla ıslah sisteminde toleran tiplerin seçilmesinin önemini vurgulamışlardır (Anjum vd., 2017).

Mısır bitkisinde kuraklık stresi ile mücadele eden mekanizmaların da olduğu bildirilmektedir. Ancak mısır çeşitleri arasındaki fizyolojik ve moleküler farklılıklar bilinmemektedir. Yapılan bir çalışmada zıt toleransa sahip 2 mısır çeşidinin kuraklık stresine karşı tepkileri protomik analizler kullanılarak karşılaştırılmıştır. Fizyolojik analizler, kuraklığa dayanıklı SD609 mısır çeşidinin koruyucu siklik elektron akışı mekanizmasını ve antioksidatif etkisini artırarak yüksek fotokimyasal verimlilik enzimlerin aktivitesi ile nispeten koruduğunu göstermiştir. Proteomik analiz, 198 ve 102 proteinin SD609'da farklı şekilde ifade edildiğini ortaya çıkarmıştır. Kuraklığa duyarlı SD902 çeşidi, GO ve KEGG zenginleştirmeleri, SD609'un yukarı regüle edildiğini göstermiştir. Fotosentez ile ilişkili proteinler, antioksidanlar / detoksifiye edici enzimler, moleküler şaperonlar ve metabolik enzimler, kuraklığa dayanıklı çeşitte yüksek oranlarda ifade edilmiştir. SD902'da yalnızca moleküler şaperonlar ve sakaroz sentez yolları indüklenmiş ve bozulmuş fotosistemi koruyamamıştır (Li vd., 2021).

Serin/treonin protein fosfatazlar kuraklık stresinde bitkilerde temel roller oynar. PP2C, gelişim ve stres tepkisi ile ilgili çeşitli işlevlere sahipken, mısırdaki çeşitli streslerle ilgili olarak PP2C genlerinin işlevleri hakkında çok az şey bilinmektedir. Yapılan bir çalışmada, üç ZmPP2C geni, ZmPP2C55, ZmPP2C28 ve ZmPP2C71 tanımlanmıştır. Hücre altı lokalizasyon, ZmPP2C28 ve ZmPP2C71'in nükleer proteinler olduğunu ve ZmPP2C55'in hem çekirdekte hem de sitoplazmada bulunduğunu göstermiştir. RT-qPCR analizi, ZmPP2C55, ZmPP2C28 ve ZmPP2C71'in köklerde, yapraklarda ve gövdelerde ifade edildiğini göstermiştir. ZmPP2C geninin işlevini araştırmak için ZmPP2C55'i aşırı eksprese eden transgenik hatlar üretilmiştir. Transgenik bitkiler, fideler üç yapraklıyken daha yüksek yaprak su kapsamı, prolin içeriği, POD ve SOD aktiviteleri, GSH içeriği ve GSH/GSSG oranı ve daha düşük MDA içeriği, elektrolit sızıntısı ve GSSG içeriği sergilemiştir. ZmPP2C55'in aşırı ekspresyonunun, kuraklık stresine karşı toleransı pozitif olarak arttırdığını bildirilmiştir (Zhang vd., 2022).

Su stresi toleransının dört mısır çeşidinin AP2 gen ekspresyonu, fizyolojisi ve verimi üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada, bölünmüş parsel deneme deseninde ve üç tekrarlamayla rastgele tam blok tasarımı kullanılmıştır. Ana parsellerde uygulanan dört sulama uygulaması, 1) tam sulama (kontrol), 2) sapa kalkma evresinde sulamanın durdurulması, 3) tane dolumu sırasında sulama yapılmaması ve 4) hem sapa kalkma hemde tane doldurma aşamasında sulamanın yapılmaması şeklinde uygulanmıştır. Alt parseller ise dört mısır çeşidinden oluşmaktadır: Furat, Dijlah, ZP ve Konsens. Araştırma sonuçları, mısır bitkilerinin sapa kalkma aşamasında sulama yapılmadığında yaprak suyu ve klorofil içeriğinin önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Ancak sulamanın durdurulması peroksidaz ve katalaz enzim konsantrasyonlarını önemli ölçüde artırmıştır. Sapa kalkma aşamasında ve sapa kalkma ve tane doldurma aşamalarında sulamanın yapılmaması, sırasıyla 31,68 ve 31,69 döngü ortalama CT değerleri ile döngü eşiği değerlerinde önemli bir düşüşe neden olmuştur. AP2 gen ekspresyonu ve CT değerleri negatif bir korelasyona işaret etmiştir. Çalışma, AP2 geninin mısırın su stresi toleransını arttırdığını ve kuraklığa dayanıklı olduğu bilinen "Furat" mısır çeşidindeki gen ifadesinin bunu doğruladığını bildirmiştir (Mohsin ve Farhood, 2023).

Toprak suyunun sınırlandırıldığı ve yeterli sulama koşulları altında, kendi içinde yetiştirilmiş iki cin mısır hattının (kuraklığa dayanıklı olarak tanımlanan L71 ve kuraklığa

duyarlı olarak tanımlanan L61) büyüme dinamikleri, gaz değişim performansı ve proteomik profilleri üzerine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çiçeklenme sırasında toprağın su sınırlamasına toleransla ilişkili mekanizmaları ortaya çıkarmayı amaçlayan çalışmada, bitkiler, 150 cm uzunluğunda lizimetre içerisinde perlit ve turbadan oluşan bir substratta tane dolana kadar yetiştirilmiştir ve iki su koşuluna tabi tutulmuştur: i) lizimetre kapasitesinde (LC - %100) sulandı (WW) ve ii) su- kısıtlaması (WS). WS koşulları altında bitkiler kademeli olarak %45 LC'ye ulaşmış ve 10 gün boyunca bu seviyede tutulmuştur. L71, WC'den bağımsız olarak hem sürgün hem de kök sistemlerinde en yüksek kuru biyokütle değerlerini sergilemiştir ve bunun da onun en sağlam genotip statüsüne işaret ettiği bildirilmiştir. Uygulanan su sınırlaması erken yaşlanmaya, klorofil bozulmasına ve antosiyanin seviyelerinin artmasına neden olmuş, L61'de daha belirgin bir etki gözlenmiştir. Gaz alışverişine ilişkin özellikler, hatlar arasındaki farklılıkları yalnızca WS koşullarında ortaya çıkarmıştır. Toleranslı hatta 169 diferansiyel olarak birikmiş protein (DAP) ve hassas hatta 386 DAP olmak üzere toplam 1838 protein tanımlanmıştır. Özellikle enerji metabolizması, fotosentez, oksidatif stres tepkisi ve protein sentezi yollarındaki farklılıklar, L71 ve L61 arasındaki temel ayrımlar olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak, araştırma bulgularının cin mısırındaki toprak suyu sınırlamasına adaptasyonla ilişkili proteomik profillerdeki değişikliklere dair değerli bilgiler sunduğu vurgulanmıştır (Schmitt vd., 2024).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Bitki Materyali

Projede, cin mısırları (*Zea mays var. everta*), şeker mısırları (*Zea mays var. saccharata*) ve at dişi (*Zea mays var. indentata*) olmak üzere 3 farklı mısır varyetetesinin tohumu kullanılmıştır. Kullanılan varyetelere ait çeşit özellikleriyle ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

Baharcin (cin mısırları); sıcaklık stresine dayanıklıdır. Köklerin su toplama ve tutma kapasitesi yüksektir. Toprak seçiciliği yoktur. Tüm ikinci ürün koşullarında ekilebilir. Hızlı nem atma kapasitesine sahiptir. Verim miktarı dekara 450-850 kg arasında değişir.

Adapare (şeker mısırları); taze tüketim için hasat süresi ortalama 80 gündür. Koçanı tam doldurma özelliği iyi olup, koçan uzunluğu ortalama 19,5-20 cm, koçanda sıra sayısı 14-16 olan çeşit Su tipi şeker mısır olarak taze tüketime uygundur.

P0937 (atdişi mısır); orta erkenci (FAO550) bir mısır çeşididir. Kuraklığa toleranslıdır. Üniform koçan yapısına, sağlam kök ve gövde yapısına, yüksek verim potansiyeline sahiptir.

#### 3.2. Deneme Toprağı

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Ziraat Fakültesi Uygulama ve Araştırma arazisinden 0-30 cm derinlikten alınan deneme toprağının fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Toprak tuzsuzdur ve kumlu-tınlı bir dokuya sahiptir. Toprağın pH’ı 7,99’dur, bu da alkali bir yapıya işaret eder. Organik madde içeriği %1,08 ile düşüktür. Ayrıca toprak kireçlidir ve kalsiyum içeriği %1,98’dir. Yeterli düzeyde potasyum, bakır ve demir içerir, ancak fosfor, manganez veya çinko içeriği yetersizdir (Soil Survey Manual, 2004).

Çizelge 3. 1. Araştırma topraklarının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri

| Kum  | Silt  | Kil   | pH   | Tuz  | CaCO <sub>3</sub> | Organik Madde | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | Fe   | Zn                     | Cu   | Mn   |
|------|-------|-------|------|------|-------------------|---------------|-------------------------------|------------------|------|------------------------|------|------|
| (%)  | (%)   | (%)   |      |      | (%)               |               | (kg da <sup>-1</sup> )        |                  |      | (mg kg <sup>-1</sup> ) |      |      |
| 44,2 | 32,64 | 23,16 | 7,99 | 0,01 | 1,98              | 1,08          | 5,6                           | 254              | 2,81 | 0,24                   | 1,73 | 5,64 |

### 3.3. Tarla Kapasitesinin Belirlenmesi

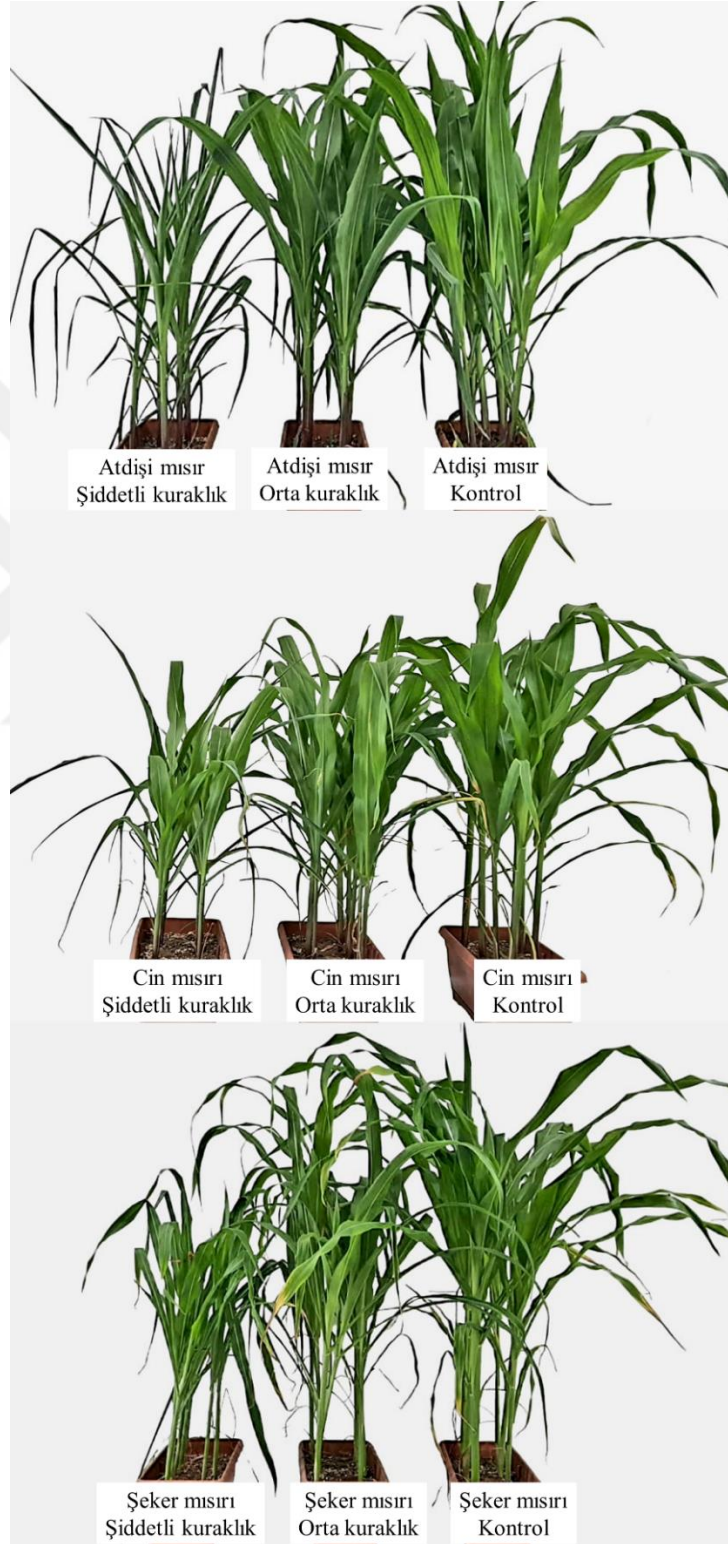
Toprağın tarla kapasitesinin belirlenmesi için 1 kg toprak altı delikli bir saksıya alınıp su ile doyurulmuştur. Ardından 24 saat beklenerek yer çekiminin etkisiyle süzülen su toplanmıştır. Son olarak, toprağın tarla kapasitesi fark yöntemi kullanılarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Danish vd., 2020).

$$\text{Tarla kapasitesi (\%)} = \frac{\text{Eklenen su (ml)} - 24 \text{ saatte sızan su (ml)}}{\text{Toprak ağırlığı (g)}} \times 100$$

### 3.4. Bitkilerin Yetiştirilmesi ve Kuraklık Uygulamaları

Denemede yetiştirilen mısır bitkileri 2:1:1:1 oranında toprak:kum:torf:perlit doldurulmuş 10 litrelik plastik saksılarda yetiştirilmiştir. Bitkilere ekim öncesi makro ve mikro elementleri içeren temel gübre çözeltisi her kg toprağa 200 mg N; (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 125 mg K ve 100 mg P kg toprak<sup>-1</sup>; KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 2,5 mg Fe; Fe-EDTA ve 5 mg Zn; ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O olarak uygulanıp karıştırılmıştır. Her bir uygulama ve tekrür için kullanılacak saksılara 12 tohum ekilmiş, bitkilerin çıkışından sonra her saksıda 6 bitki kalacak şekilde seyreltme yapılmıştır. Bitkiler deneme boyunca 25/17°C’de, 14 saat aydınlık/10 saat karanlık, 800 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ışık yoğunluğu ve %65 nem koşullarında tutulmuştur. Bitkilerin çıkışından sonra hasada kadar haftada bir defa Hoagland çözeltisi (5 mM KNO<sub>3</sub>, 1 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 5 mM Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, 2 mM MgSO<sub>4</sub>, 50 µM H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 10 µM MnCl<sub>2</sub>, 1 µM ZnSO<sub>4</sub>, 0.4 µM CuSO<sub>4</sub>, 0.1 µM H<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>, 20 µM Fe-EDTA) uygulanmıştır. Mısır bitkilerinin çimlenmesi ve çıkışını takip eden ilk 14 gün boyunca V3 aşamasına kadar normal sulama koşullarında (%80 tarla kapasitesi) yetiştirilmiştir. Bu aşamada kuraklık uygulamalarına başlanılmıştır. Kontrol grubu deneme boyunca %80 tarla kapasitesinde tutulurken, orta derecede kuraklık için %50 tarla kapasitesi,

şiddetli kuraklık stresi için %30 tarla kapasitesinde tutulmuştur (Danish vd., 2020). Kuraklık uygulamalarına bitkilerin çıkışından itibaren 50 gün süreyle V14 aşamasına, yani vejetatif dönemin sonuna kadar devam edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Denemede yetiştirilen bitkiler ve kuraklık uygulamaları arasındaki farklılıklar

Deneme boyunca bitkilerin sulanmasına Delta T Device HH2 toprak nem ölçer cihazıyla ölçüm yapılarak karar verilmiştir (Şekil 3.2). Cihaz hazırlanan karışıma ve toprak tipine göre kalibre edilmiştir. Yukarıda açıklanan yöntemle tarla kapasitesi belirlendikten sonra belirlenen sulama suyu miktarına göre %80 tarla kapasitesinde sulanacak kontrol bitkilerine 350 ml, %50 tarla kapasitesinde sulanacak orta kuraklık stresi grubuna 220 ml ve %30 tarla kapasitesinde sulanacak şiddetli kuraklık grubu bitkilerine ise 130 ml su verilmiştir.



Şekil 3.2. Toprak nem ölçer cihazı ile tarla kapasitesinin ölçülmesi (%30 tarla kapasitesini göstermektedir. Sulama sonrası ölçüm yapılmıştır).

50 gün sonunda bitkiler hasat edilerek alınan yaprak örneklerinde aşağıda detaylı anlatılan analizler yapılmıştır.

### 3.5. Bitki Analizleri

#### 3.5.1. Bitki boyu (cm)

Bitkilerin boy uzunlukları cetvel yardımıyla ölçülerek cm cinsinden belirlenmiştir.

#### 3.5.2. Yaprak alanı (cm<sup>2</sup>)

Yaprak uzunluğu ve yaprak genişliği hasattan önce milimetrik cetvel kullanılarak ölçülmüştür. Yaprak alanını hesaplamak için yaprak uzunluğu  $\times$  yaprak genişliği  $\times$  0,75 formülü kullanılmıştır.

#### 3.5.3. Yaprak klorofil içeriği (Spectrum units)

Bitki yaprağında klorofili oransal olarak “Spectrum Field Scout CM 1000” klorofil metre ile hasadın hemen öncesinde belirlenmiştir. Ölçüm işlemi, klorofil metre yaprağa 30 cm uzaklıktan tutularak yapılmıştır (Wenkel vd., 2003).

#### 3.5.4. Bitki yaş ve kuru ağırlığı (g)

Hasat edilen bitkilerin taze yaprak ağırlıkları hassas terazi ( $\pm$  0,01 g) kullanılarak belirlenmiştir. Daha sonra yapraklar kağıt torbalara konularak 65°C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve kuru ağırlığı belirlenmiştir.

#### 3.5.5. Yaprak oransal su kapsamı (YOSK) ve turgor kaybı (TK)

Bitkilerin YOSK ve TK değerlerini belirlemek amacıyla yaprak örneklerinden 2 cm çapında 3 adet disk çıkarılmıştır. Yaş ağırlıkları (YA), 4 saat saf suda bekletildikten sonra turgor ağırlıkları (TA) ve 70°C'de 24 saat bekletildikten sonra kuru ağırlıkları (KA) kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, aşağıdaki formüller kullanılarak YOSK ve TK değerlerinin hesaplanmasında kullanılmış ve elde edilen değerler yüzde olarak ifade edilmiştir (Gülen ve Eriş, 2003).

$$YOSK = (YA - KA) / (TA - KA) \times 100$$

$$TK = (TA - YA) / TA \times 100$$

### 3.5.6. Prolin içeriği

Prolin analizi Bates vd. (1973) tarafından açıklanan metodolojiye uygun olarak yapıldı. Analiz için 0,2 g bitki yaprağı 4 mL %3 sülfosalisilik asit ile homojenize edildi ve 6000 rpm'de 10 dakika santrifüj (Neofuge-13R) yapıldı. Süpernatanttan 2 mL cam test tüplerine aktarıldı ve üzerine 2 mL galasiyel asetik asit ve 2 mL asit ninhidrin ilave edildi. Tüpler alüminyum folyo ile kaplandı ve 100°C'deki su banyosunda bir saat bekletildi. Numuneler daha sonra on dakika boyunca bir buz banyosunda soğutuldu. Soğutulan numunelere 4 mL tolüen ilave edildi, bunlar daha sonra hafifçe çalkalandı ve beş dakika bekletildi. Tüplerde iki faz gözlemlendikten sonra üst fazdan numuneler alınarak prolin standartları kullanılarak önceden hazırlanan kalibrasyon eğrisi üzerinde spektrofotometre (Thermo- Aquamate) ile 520 nm'de konsantrasyonlar belirlendi. Prolin miktarı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplandı.

$$[(\mu\text{g prolin/ml} \times \text{ml tolüen}) / 115,5 \mu\text{g}/\mu\text{mol}] / [(g \text{ numune})/5] = \mu\text{ mol prolin/g}$$

taze ağırlık.

### 3.5.7. Çözünabilir protein içeriği

Tüm uygulamalardan elde edilen yaprak örneklerinin çözünür protein konsantrasyonları, Bradford'un (1976) yöntemine göre bir sığır serum albümini (BSA) standardı kullanılarak belirlendi. Çözeltilinin absorbans değerleri spektrofotometrede (Thermo- Aquamate) 595 nm dalga boyunda okundu. Çözünür protein miktarı, BSA standartları kullanılarak oluşturulan standart bir eğriye göre hesaplandı.

### 3.5.8. Elektrolit sızıntısı (ES), zararlanma yüzdesi (ZY) ve membran dayanıklılık indeksi (MDİ)

Hem kontrol grubundan hem de kuraklık uygulanan yapraklardan 2 cm çapında 3 adet disk alınarak, distile su ile yıkandıktan sonra kurutuldu ve test tüplerine yerleştirildi. Daha sonra her tüpe 20 ml distile su eklenerek örnekler çalkalayıcıda 250 rpm'de 4 saat oda sıcaklığında inkübe edildi. Elektrolit sızıntısını (ES) belirlemek için ilk okumalar (OD1) bir EC ölçüm cihazı kullanılarak yapıldı. Daha sonra tüpler, dokuların tamamen öldürülmesi için 121°C'de 15 dakika süreyle otoklavlandı. Numuneler oda sıcaklığına ulaştıktan sonra elektrolit sızıntı ölçümü (OD2) tekrarlandı. Elektrolit sızıntısı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplandı (Sairam vd., 1997).

$$\% \text{ Elektrolit Sızıntısı (ES)} = (\text{OD1}/\text{OD2}) \times 100$$

Zararlanma yüzdesi bulunan elektrolit sızıntısı değerine göre aşağıdaki formülle hesaplandı.

$$\% \text{ Zararlanma} = (\text{StresES} - \text{kontrolES}) / (100 - \text{kontrolES}) \times 100$$

Bitkilerin membran dayanıklılık indeksi ise MDİ=  $(1 - \text{OD1}/\text{OD2}) \times 100$  formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

### 3.5.9. Malondialdehit (MDA) miktarı

Kontrol ve stres gruplarındaki bitkilerin yaprak dokularındaki lipid peroksidasyonunun boyutu, Hodges vd. (1999) tarafından açıklanan yöntem kullanılarak MDA miktarının ölçülmesiyle belirlendi. Yöntem, kontrol ve stres gruplarının yapraklarından üç tekerrür halinde alınan 0,1 g taze yaprak numunesinin, küçük parçalar halinde kesildikten sonra buz üzerinde 2 ml %0,1 trikloroasetik asit (TCA) ile homojenleştirilmesini içerir. Yukarıda adı geçen karışım daha sonra 25°C'de 12.000 rpm'de 15 dakika boyunca santrifüjlendi, ardından süpernatant MDA miktarını belirlemek için kullanıldı. Eşit hacimlerde süpernatant ve %0,5 tiyobarbitürik asit (TBA) içeren %20 TCA çözeltisi yeni tüplere aktarıldı. Daha sonra tüpler 95°C'deki su banyosunda 30 dakika

bekletildi ve ardından tüplerin içindeki reaksiyonların durdurulması için buz banyosuna aktarıldı. Daha sonra tüpler 1000 rpm'de beş dakika santrifüj edildi ve spektrofotometrede 532 ve 600 nm dalga boylarında absorbans ölçüldü. Kör olarak %0,5 TBA içeren %20 TCA çözeltisi kullanıldı. Yaprak dokularındaki MDA içeriği ( nmol g TA<sup>-1</sup> ) aşağıdaki formüle göre hesaplandı.

$$\text{MDA içeriği} = [(A_{532} - A_{600}) \times \text{ekstraksiyon hacmi}] / [155 \times \text{numune miktarı}]$$

### 3.5.10. Hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) miktarı

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> seviyeleri Velikova vd. (2000) tarafından açıklanan metodolojiye uygun olarak belirlendi. Bu amaçla yaprak dokuları (500 mg) 5 mL %0,1 TCA ile homojenize edildi. Homojenat daha sonra 12.000 g'de 15 dakika süreyle santrifüjlendi. 0,5 mL süpernatant hacmi, 0,5 mL 10 mM potasyum fosfat tampon çözeltisi (pH 7,0) ve 1 mL 1 M KI ile birleştirildi. Süpernatantın absorbansı, 390 nm dalga boyunda spektrofotometre ile ölçüldü. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarı standart bir eğri aracılığıyla belirlendi.

### 3.5.11. Antioksidan enzim aktiviteleri

Çakmak ve Marschner (1992) tarafından açıklanan yöntemle göre analiz edildi.

Enzimlerin ekstraksiyonu için 0,2 g bitki yaprağı 2 mL KP tamponunda (pH 7,6) homojenize edildi ve 15.000 g'de 4°C'de 20 dakika santrifüj edildi. Daha sonra süpernatant uzaklaştırıldı ve aşağıda ayrıntıları verildiği gibi her bir enzim aktivitesi için reaksiyonlar hazırlandı. Yukarıda bahsedilen ekstraksiyondan elde edilen süpernatant, tüm enzim aktivitesi okumaları için kullanıldı. Enzim aktiviteleri protein içeriğine göre hesaplandığından öncelikle Bradford yöntemine göre protein içeriği belirlendi.

Superoksit dismutaz (SOD) aktivitesini belirlemek için; cam tüpler içerisinde 2,9 mL KP tamponu (pH 7,6), 0,5 mL sodyum bikarbonat, 0,5 mL metiyonin, 0,5 mL nitro mavi tetrazolyum klorür (NBT), 0,5 mL riboflavin ve 0,1 mL örnek süpernatantından oluşan bir çözelti hazırlandı. Tüpler hafifçe karıştırıldı ve daha sonra ışık altında 10-15 dakika (renk maviye dönene kadar) inkübe edildi. Daha sonra 560 nm'deki absorbans spektrofotometrede belirlendi. Enzim miktarı, mg protein başına µmol cinsinden hesaplandı.

APX aktivitesinin belirlenmesi için 0,7 mL KP tamponu (pH 7,6), 0,1 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 0,1 mL örnek süpernatantı ve 0,1 mL askorbik asit ilave edildi ve 290 nm'de absorbanans değerleri spektrofotometrede bir dakika boyunca okundu. Enzim miktarı, dakikada mg protein başına  $\mu$ mol olarak hesaplandı.

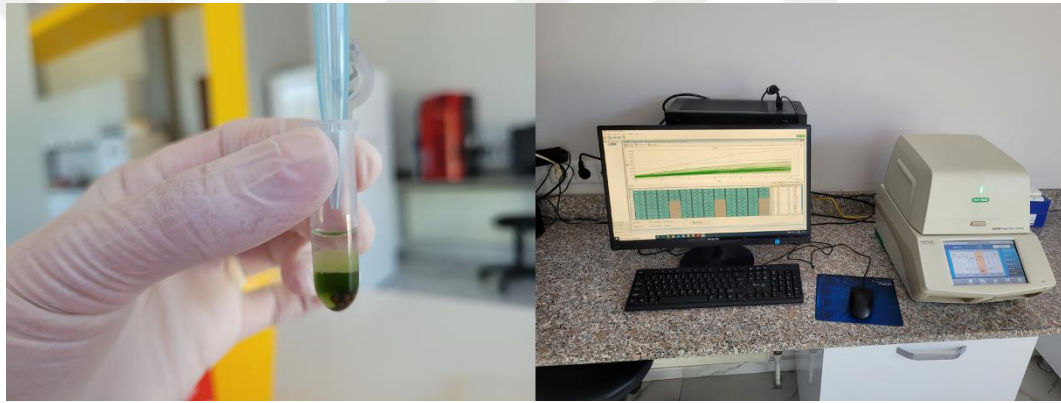
CAT aktivitesinin belirlenmesi için, 0,8 mL KP tamponu (pH 7,6), 0,1 mL örnek süpernatantı ve 0,1 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> eklenerek 1 dakika boyunca 240 nm'de absorbanans okumaları ile belirlendi. Bir dakikada absorbanansı azaltan enzim miktarı nmol /mg protein/dakika olarak hesaplandı.

### 3.5.12. HSP70 ve HSP90 gen ekspresyon seviyeleri

Sıvı azot içinde dondurulmuş 100 mg öğütülmüş yapraktan toplam RNA'yı izole etmek için RNeasy Plant Mini Kit ( Qiagen, CA, ABD) kullanıldı. RNA izolasyonunun ardından, RNA'nın saflığı bir nanodrop cihazı (Thermo ND2000, ABD) kullanılarak ölçüldü. cDNA sentezi için A260/A280 oranı yaklaşık 2,0 olan RNA örnekleri kullanıldı. İstenilen eşiğin altında değerler sergileyen örneklerden toplam RNA bir kez daha izole edildi ve bu işlem, gerekli değere ulaşıncaya kadar tekrarlandı. Ölçülen RNA konsantrasyonları 1.000 ng/ $\mu$ L'ye ayarlandı ve ters transkripsiyon polimeraz zincir reaksiyonu (RT-PCR) yoluyla cDNA elde edildi. RQ1 RNase içermeyen DNaz'ın (Promega) uygulanması her türlü DNA kontaminasyonunu ortadan kaldırdı. Daha sonra cDNA numuneleri 100 ng/ $\mu$ L'ye ayarlandı ve ilgilenilen gen ürünlerinin ekspresyon seviyeleri, qRT -PCR (gerçek zamanlı PCR) ile belirlendi. Hazırlanan RNA örneklerinden cDNA sentezinin ardından, seçilen genler için spesifik primerler ve housekeeping geni olarak mısır Aktin kullanılarak bir qRT -PCR analizi gerçekleştirildi (Çizelge 3.2). Çalışma, CFX Connect Gerçek Zamanlı PCR Tespit Sistemi (Bio-Rad, Kaliforniya, ABD) ve 2X Magic SYBR Kiti (Procomcure, Avusturya) kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 3.3). Göreceli ifadeyi hesaplamak için  $2^{-\Delta\Delta C_t}$  tekniği kullanıldı (Livak ve Schmittgen, 2001). Her analiz için iki teknik ve üç biyolojik kopya kullanıldı.

Çizelge 3. 2. Ekspresyon analizi yapılan genlerin primer dizileri

| Gen ismi                            | Forward primer        | Reverse primer           |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| ZmActin1<br>(ACCESSION:<br>J01238)  | ATCACCATTGGGTCAGAAAGG | GTGCTGAGAGAAGCCAAAATAGAG |
| ZmHSP90<br>(ACCESSION:<br>EE257979) | ATCTGGCACTTCAGGAACAGG | AACGCCTCCATTGCTTCGTAT    |
| ZmHSP70<br>(ACCESSION:<br>DY307167) | TGCTTGACGTCACTCCTCTC  | CTCGTACACCTGGATCAACACA   |



Şekil 3.3. RNA izolasyonu ve Real-Time PCR analizi

### 3.5.13. HSP70 ve HSP90 için Western blotlama

Juárez (2019) tarafından önerilen metodolojiye uygun olarak gerçekleştirildi. Numunelerin protein konsantrasyonunu ölçmek için Bradford tekniği kullanıldı. Belirlenen protein konsantrasyonlarına göre numune miktarları ayarlandı. Daha sonra numuneler %12 poliakrilamid jel üzerinde elektroforeze tabi tutuldu. Daha sonra, jelinkine eşdeğer alana sahip bir PVDF membranı, kare bir Petri plakasında bir dakika boyunca 10 mL %100 metanol içine daldırıldı. Transfer prosedürü ThermoFisher Scientific iBlot 2 Kuru Blot Sistemi kullanılarak gerçekleştirildi. Jelden membrana transfer işlemi, iBlot 2 cihazının sandviç şeklindeki membran transfer mekanizması kullanılarak 20 voltta 7 dakika süreyle gerçekleştirildi. Transfer prosedürünün tamamlanmasının ardından bir bloke etme çözümü formüle edildi. Daha sonra jel görüntü transfer kağıdından ayrılarak önceden hazırlanmış

bloklama solüsyonuna beş dakika süreyle daldırıldı. Bloklama solüsyonu daha sonra her tüpte 2 ml olacak şekilde 2,5 ml'lik tüplere aktarıldı; bu, kullanılan antikor miktarına eşdeğerti. Bu antikor uygulama prosedürü içindi. Bu araştırmada ikincil antikor olarak Agrisera UBQ11 (dahili kontrol), HSP70, HSP90 ve HRP Keçi Anti-Tavşan IgG (H+L) kullanıldı. Daha sonra iBind flex kartı membran silindirine takıldı ve ardından 10 mL bloklama solüsyonu ile ıslatıldı. Membran 2,5 saatlik bir süre boyunca ECL çözeltisine batırıldı (Şekil 3.4). Görüntüleme işleminde kemilüminesans görüntüleme cihazı kullanıldı. Görüntülemeden önce membran, karanlıkta beş dakika boyunca 1:1 ECL solüsyonunda inkübe edildi. Filmlerin son bant görüntüleri tarayıcı yardımıyla dijital ortama dönüştürüldü. Bantların dansitometrik analizi, Amerikan Sağlık Enstitüsü'nün "Image J" aracı (<http://rsb.info.nih.gov/nih-image/>) kullanılarak gerçekleştirildi.



Şekil 3.4. Western blotlama işleminin bazı basamaklarından görüntüler

### 3.6. İstatistiksel Analizler

Çalışma verileri, IBM SPSS 26 istatistik programı kullanılarak faktöriyel deneme desenine göre varyans analizine tabi tutulmuştur. Ortalamalardaki farklılıkları belirlemek için Duncan çoklu karşılaştırma testi kullanılmıştır. Veriler, verilerin ortalamasını ve standart hatasını gösteren çubuk grafikler ve hata çubukları halinde sunulmuştur. İncelenen parametreler arasındaki korelasyonlar,  $p < 0,05$ 'e göre Pearson korelasyon analizi ile analiz edilmiştir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Bitki Boyu ve Yaprak Alanı

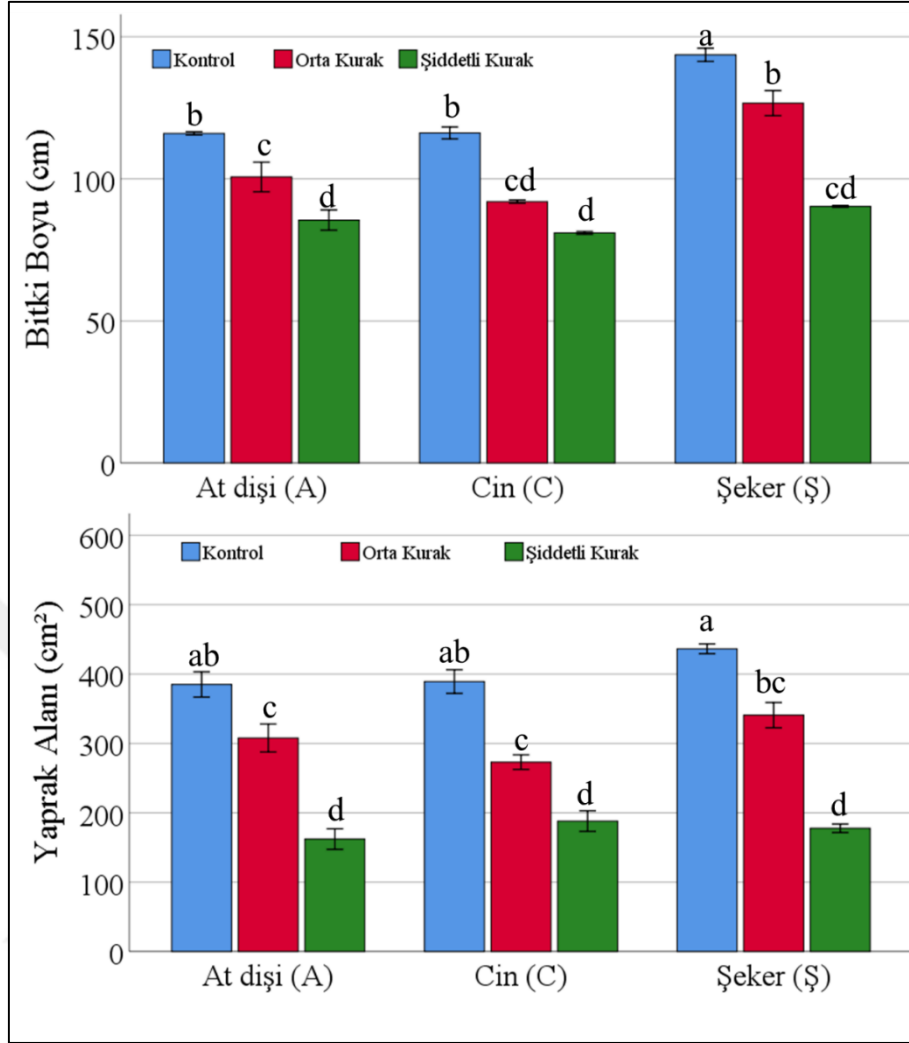
Yapılan varyans analizine göre bitkilerin bitki boyu ve yaprak alanı değerleri mısır varyeteleri, kuraklık uygulamaları ve bunların interaksyonu açısından önemli farklılıklar göstermiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının bitki boyu ve yaprak alanına etkisini gösteren varyans analizi

| Varyasyon kaynağı     | SD | Bitki boyu (KO) | Yaprak alanı (KO) |
|-----------------------|----|-----------------|-------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 1450,6 **       | 3487 *            |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 3543.2 **       | 117467 **         |
| M × K                 | 4  | 176,0 **        | 1460 öd           |
| Hata                  | 18 | 23.3            | 665               |

\* =  $p \leq 0,05$ , \*\* =  $p \leq 0,001$ , öd = önemli değil, KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi

Kuraklık stresi üç varyetede de bitki boyunda ve yaprak alanında azalmaya neden olmuştur (Şekil 4. 1). Şeker mısırı normal koşullar altında en yüksek bitki boyuna (143,67 cm) sahipken, atdişi mısır ve cin mısırı benzer bitki boyu değerlerine sahipti. Cin mısırı orta dereceli kuraklık sırasında bitki boyunda en büyük azalmayı yaşarken, şeker mısırı şiddetli kuraklık stresinde önemli bir azalma göstermiştir. Mısırın bitki boyu hem genetik hem de çevresel faktörler tarafından belirlenir (Peiffer vd., 2014). Kuraklık stresinin bitki boyu üzerinde olumsuz etkisi birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir (Anjum vd., 2016; Gomaa vd., 2017; Pradawet vd., 2023). Ancak kuraklığa toleranslı bitkiler, toleranssız bitkilere kıyasla morfolojik özelliklerde daha az azalma gösterir (Shahzad vd., 2023).



Şekil 4.1. Mısır bitkilerinde kuraklık stresi altında bitki boyu (cm) ve yaprak alanı (cm<sup>2</sup>) değişimleri. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

Normal koşullar ve orta dereceli kuraklık stresi altında şeker mısıırı en yüksek yaprak alanına sahipti. Şiddetli kuraklık nedeniyle yaprak alanı %59,3 oranında azalarak 177,65 cm<sup>2</sup>'ye gerilemiştir. Orta dereceli kuraklık stresi altında, cin mısıırında yaprak alanında en büyük düşüş yaşanmıştır. Orta kuraklıktan şiddetli kuraklığa geçiş sırasında yaprak alanında en büyük azalma hem atdişi mısıırında hem de şeker mısıırında gözlemlenmiştir (Şekil 1). Birçok araştırmacı kuraklık stresi altında mısır yaprak alanının azaldığını vurgulamıştır (Guo vd., 2023; Luqman vd., 2023; Pradawet vd., 2023). Erken kuraklık stresi bitki büyümesinin azalmasına ve ciddi verim kayıplarına neden olabilir. Bu etki, azot alımının azalmasıyla doğrudan bağlantılı olan yaprak yeşilliğindeki azalmayla daha da güçlenir ve bu da yaprak alanında ve fotosentetik aktivitede bir azalmaya neden olur (Urban vd., 2021). Önceki araştırmalar, yaprak alanı indeksi gibi morfolojik özelliklerin, mısır bitkilerinin fotosentetik

oranında önemli bir rol oynadığını göstermiştir (Shah vd., 2014). Yaprak alanının azalması ve klorofil pigmentlerinin bozulması nedeniyle kuraklığa bağlı ciddi verim kaybı meydana gelebilir.

#### 4.2. Bitkilerin Klorofil İçerikleri

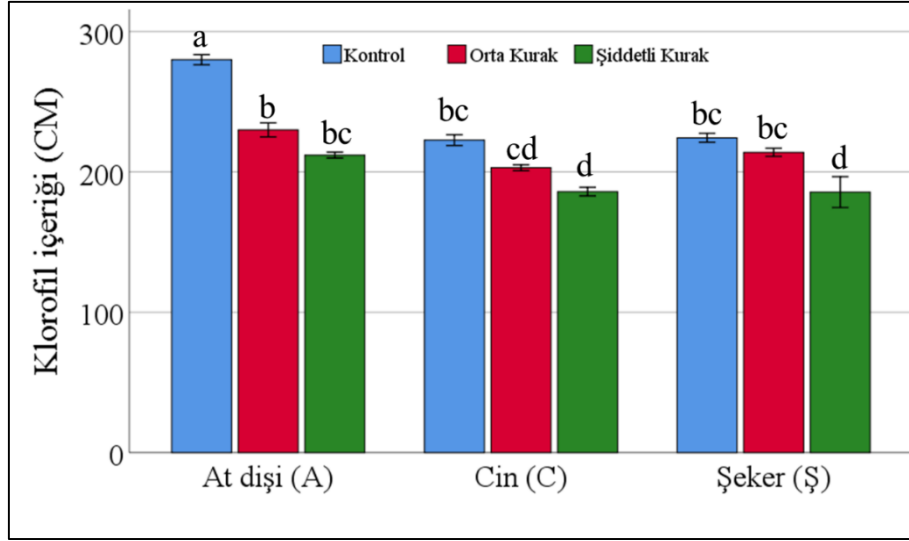
Orta ve şiddetli kuraklık stresine maruz bırakılan mısır bitkilerinin klorofil içerikleri mısır varyeteleri, kuraklık stresi ve bunların interaksyonu açısından önemli varyasyon göstermiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının klorofil içeriğine etkisini gösteren varyans analizi

| Varyasyon kaynağı     | SD | Klorofil içeriği (KO) |
|-----------------------|----|-----------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 3654.9 **             |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 5159.3 **             |
| M × K                 | 4  | 388,6 **              |
| Hata                  | 18 | 70.1                  |

\*\* =  $p \leq 0,001$ , KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi

Atdışi mısır, hem normal hem de kurak koşullar altında en yüksek klorofil içeriğine sahipti (Şekil 4.3). Ancak kuraklığa maruz kaldığında en fazla klorofil kaybı da at dişi mısırdaki gözlemlenmiştir. Şeker mısırdaki, orta dereceli kuraklık stresi altında klorofil içeriğini diğer varyetelere göre daha iyi koruyabilmiştir. Cin mısırdaki ise şiddetli kuraklık altında en az klorofil kaybına sahipti. Önceki araştırmalar kuraklığa toleranslı genotiplerin strese duyarlı genotiplere göre daha yüksek klorofil seviyelerini koruyabildiğini göstermiştir (Efeoğlu vd., 2007; Khayatnezhad ve Gholamin, 2012; Gholamin ve Khayatnezhad , 2020; Shahzad vd., 2023). Kuraklık stresindeki bitkiler, fotosentezi engelleyen klorofil açısından zengin yeşil dokularını kaybeder. Kuraklık stresinin neden olduğu fizyolojik hasarın boyutu bitkinin direncine ve stresin şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle hasarın türü ve derecesi farklılık gösterecektir. Yapraklardaki hasarlı kloroplastların fotosentezin gerçekleşmesini önleyeceğini belirtmek önemlidir (Chauhan vd., 2023). Engellenen fotosentez sonuçta verimin azalmasına yol açacaktır.



Şekil 4.2. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinde klorofil içeriği (CM) değişimi. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

#### 4.3. Bitkilerin Yaş ve Kuru Ağırlıkları

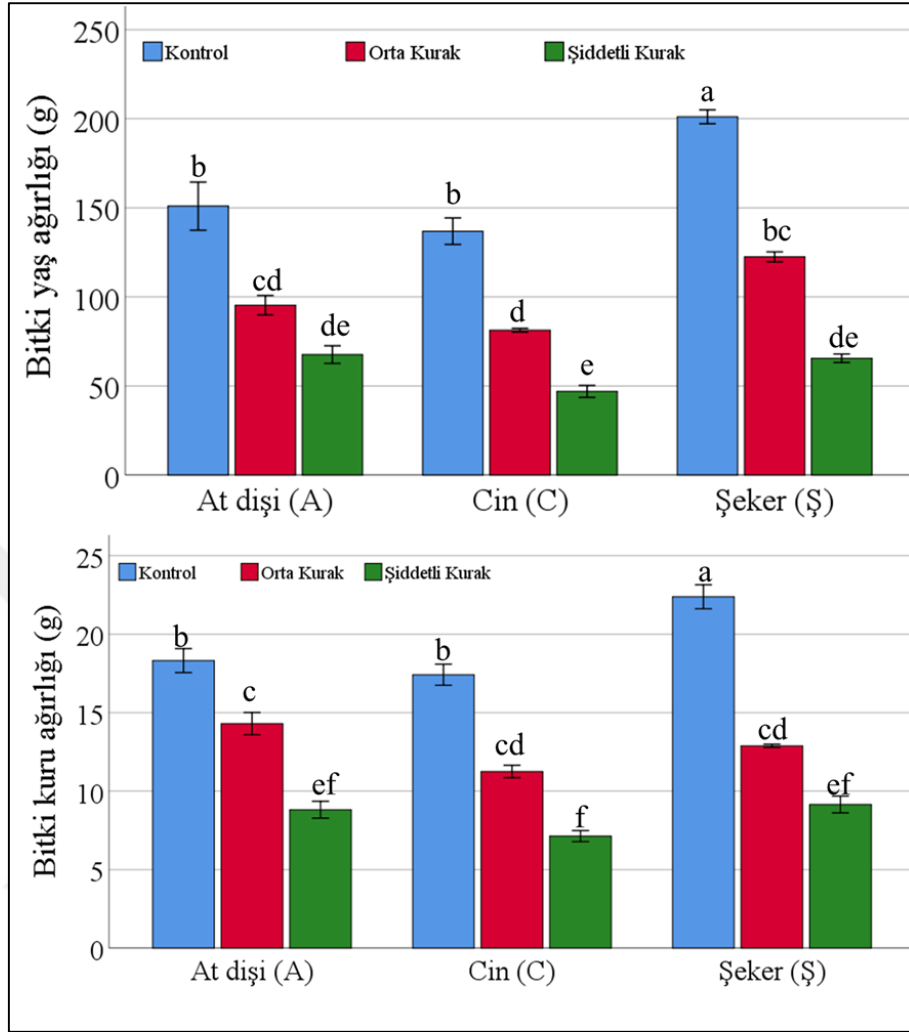
Bitkilerin yaş ve kuru ağırlıkları mısır varyeteleri, kuraklık uygulamaları ve ikisinin etkileşimini açısından istatistiksel olarak önemli farklılıklara sahiptir (Çizelge 4.3).

Kuraklık stresi altında bitkilerin hem yaş hem de kuru ağırlıkları azalır, bu da fotosentezin azalmasıyla bağlantılıdır. Mısır bitkilerinin yaş ağırlıkları 46,94 g (şiddetli kuraklık altında cin mısırı) ile 201,08 g (normal sulama altında şeker mısırı) arasında değişmiştir. Normal koşullar altında en düşük yaş ağırlığına sahip olan cin mısırında, şiddetli kuraklık altında yaş ağırlıkta %66'lık bir azalma belirlenmiştir (Şekil 4.3).

Çizelge 4.3. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının bitki yaş ve kuru ağırlığına etkisini gösteren varyans analizi

| Varyasyon kaynağı     | SD | Yaş ağırlık (KO) | Kuru ağırlık (KO) |
|-----------------------|----|------------------|-------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 3900,5 **        | 19.16 **          |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 24254.9 **       | 275,88 **         |
| M × K                 | 4  | 610,0 **         | 6.17 **           |
| Hata                  | 18 | 111.1            | 1.00              |

\*\* =  $p \leq 0,001$ , KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi



Şekil 4.3. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin yaş ve kuru ağırlığının (g) değişimi. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

Normal sulama koşullarında şeker mısırı 22,38 g ile en yüksek bitki kuru ağırlığına sahip olurken, diğer mısır varyeteleri de benzer değerlere sahipti (Şekil 4.3). Orta düzeyde kuraklık stresi uygulandığında şeker mısırında %42,4 oranında kuru madde kaybı yaşanmıştır. Ancak atdişi mısırı her iki kuraklık seviyesinde de kuru ağırlığını diğer mısır türlerine göre daha iyi koruyabilmiştir. Şiddetli kuraklıkta hem atdişi mısırında hem de şeker mısırda %59 oranında kuru ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Mısır bitkileri, su kıtlığı dönemlerinde gıda üretimi, emilimi ve taşınması konusunda zayıf bir kapasiteye sahip olabilir ve bu da kuru madde birikiminde azalmaya yol açabilir. Kuru ağırlıktaki azalma, su kısıtlamasının bir sonucu olarak diğer araştırmacılar tarafından da belgelenmiştir (Hajibabae vd., 2012; Bashir vd., 2016; Yin vd., 2024).

#### 4.4. Bitkilerin Yaprak Oransal Su Kapsamı ve Turgor Kaybı

Yapılan istatistiksel analiz, mısır varyetelerinin, kuraklık uygulamalarının ve bunların interaksiyonunun yaprak oransal su kapsamı ve turgor kaybı açısından %1 düzeyinde anlamlı olduğunu ortaya çıkarmıştır (Çizelge 4.4).

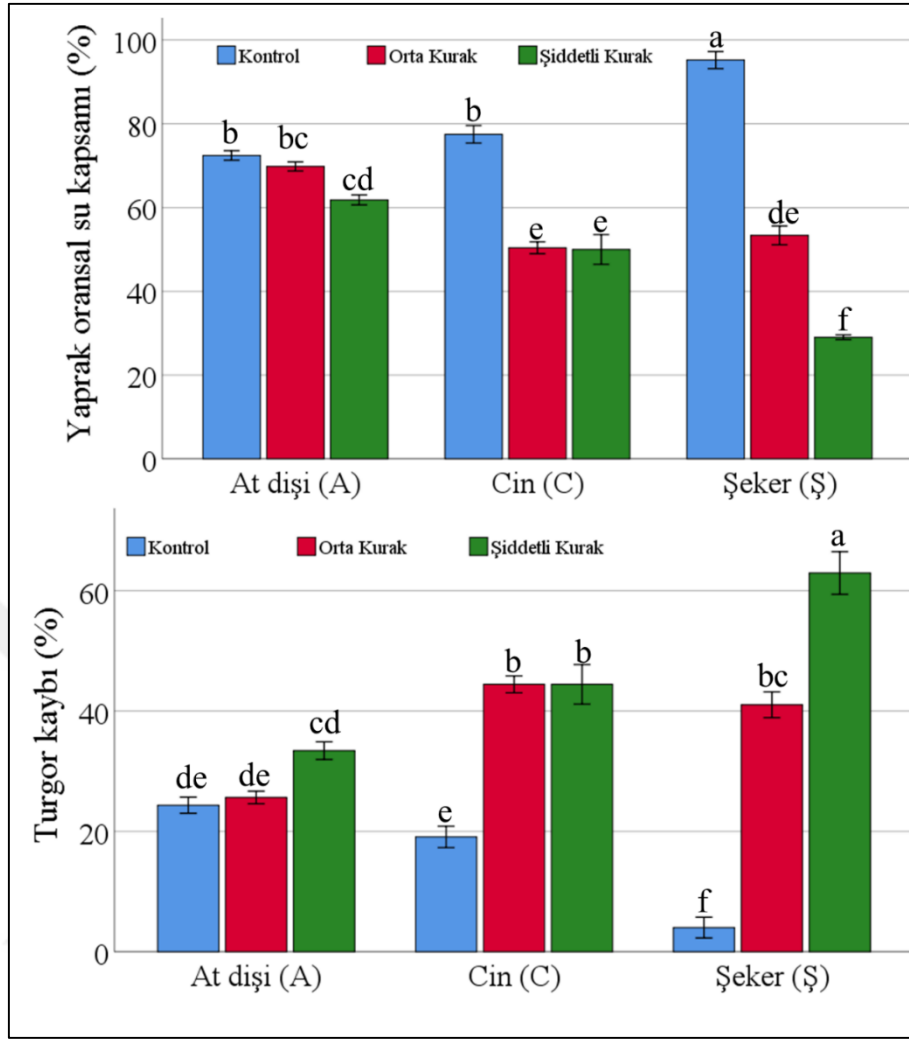
Stres etkenlerinin yokluğunda, mısır varyetelerinin yaprak oransal su kapsamı şeker mısırında en yüksek seviyeleri sergileyerek %95,20'ye ulaşmıştır (Şekil 4.4). Cin ve atdışi mısırının su içeriği sırasıyla %77,48 ve %72,43'dir. Orta dereceli kuraklık bağlamında, normal koşullar altında en düşük su içeriğine maruz kalmasına rağmen, atdışi mısırının su içeriği en yüksek düzeyde esneklik göstermiştir. Atdışi mısırın su içeriğindeki azalma yaklaşık %4 olurken, cin mısırda %35, şeker mısırda ise %44 azalma görülmüştür. Şiddetli kuraklık koşullarına tepki olarak, şeker mısırın su içeriğinde kontrole kıyasla %70'lik bir azalma görülürken, cin mısırının su içeriğinde orta dereceli kuraklık şiddetiyle aynı oranda %35'lik bir azalma görülmüştür. Ancak atdışi mısır, kontrole kıyasla su içeriğini yaklaşık %15 kaybetmiş, bu da %61,82'lik bir yaprak oransal su kapsamı değeriyle sonuçlanmıştır. Kuraklık stresi altındaki mısır bitkilerindeki turgor kaybının yaprak oransal su kapsamındaki azalışa paralel olduğu bulunmuştur. Atdışi mısırda şiddetli kuraklık stresi altında %33,42 turgor kaybı gözlenmiştir. Ancak orta derecede kuraklık stresi altında bile cin mısırı ve şeker mısırında %40'ı aşan turgor kaybı ölçülmüştür. Şiddetli kuraklıkta şeker mısırında turgor kaybı orta kuraklıkta olduğu gibi aynı seviyede kalsa da şeker mısırında turgor kaybı %62,93'e ulaşmıştır (Şekil 4.4).

Çizelge 4.4. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının yaprak oransal su kapsamı ve turgor kaybı etkisini gösteren varyans analizi

| Varyasyon kaynağı     | SD | Yaprak oransal su kapsamı (KO) | Turgor kaybı (KO) |
|-----------------------|----|--------------------------------|-------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 231.4**                        | 201.11**          |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 2844.0**                       | 2273.11**         |
| M × K                 | 4  | 676.5**                        | 550.46**          |
| Hata                  | 18 | 10.8                           | 13.71             |

\*\* =  $p \leq 0,001$ , KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi

Tarımsal verimliliği etkileyen başlıca abiyotik faktörlerden biri su kıtlığıdır. Su kıtlığının bir sonucu olan kuraklık stresi, bitkilere zarar verebilecek çok sayıda faktörün ortaya çıkmasına neden olabilir. Ancak bitkiler, kuraklık stresine karşı toleransın karmaşık sürecine yanıt olarak çok sayıda fizyolojik, biyokimyasal ve moleküler adaptasyon mekanizması geliştirmiştir (Ren vd. 2022; Schmitt vd. 2024). Kuraklık stresine bağlı su kaybı bitkilerde yaprak oransal su kapsamının azalmasıyla kendini gösterir. Bu araştırmada incelenen mısır genotiplerinin yaprak oransal su kapsamı değerlerinin kuraklığa maruz kaldıklarında azaldığı görülmüştür (Şekil 4.4). Normal koşullar altında zaten düşük bir su kapsamına sahip olan atdışi mısırın su kapsamındaki kuraklığın neden olduğu azalma, cin mısırı ve şeker mısırından önemli ölçüde daha düşüktü. Bu, atdışi mısırın su kıtlığı sırasında yaprakların su kapsamını korumada daha iyi olduğunu göstermektedir. Cin mısırı, normal koşullarla karşılaştırıldığında hem orta hem de şiddetli kuraklıklarda benzer su içeriğine sahip olmuştur. Öte yandan kuraklığın şiddetiyle şeker mısırı önemli miktarda su kaybetmiştir. Jain vd. (2019), yüksek yaprak oransal su kapsamının korunmasının kuraklıktan kaçıştan ziyade kuraklığa direnç için bir mekanizmayı temsil ettiğini ve bunun ozmotik adaptasyon gibi adaptif özelliklerden kaynaklandığını öne sürmüştür. Kuraklık koşullarında klasik kontrol sistemi, koruyucu hücre turgorunun bir sonucu olarak stomaların kapanmasını içerir. Su stresine karşı stoma tepkisindeki farklılıklar, türlerin kuraklık koşullarıyla başa çıkma konusundaki göreceli yeteneklerinin belirlenmesine yardımcı olur. Stoma iletkenliğindeki azalma, turgor kaybı ile sonuçlanan su kapsamındaki azalmaya bağlanabilir (Badr ve Brüggemann, 2020). Yaprak oransal su kapsamındaki azalma aynı zamanda bitki turgorunun da azaldığını göstermektedir ve çalışmamızda, mısır genotiplerinin su kapsamındaki azalmaya paralel olarak turgor kaybı yaşadığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin yaprak oransal su kapsamı ve turgor kaybı (%) değişimi. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

#### 4.5. Bitkilerin Prolin ve Çözünebilir Protein İçerikleri

Mısır bitkilerinin prolin ve çözünebilir protein içerikleri mısır varyeteleri, kuraklık uygulamaları ve bunların interaksyonu açısından istatistiki olarak önemli farklılıklara sahipti (Çizelge 4.5).

Kuraklık stresi arttıkça prolin birikimi atdişi ve cin mısırında artmış ancak şeker mısırında azalmıştır (Şekil 4.5). Kontrol koşullarında en düşük prolin içeriğine ( $12,13 \text{ mmol g}^{-1} \text{ TA}$ ) sahip olan atdişi mısır şiddetli kuraklığa maruz kaldığında  $35,99 \text{ mmol g}^{-1} \text{ TA}$  prolin değerine ulaşmıştır. Cin mısırın hem kontrol hem de orta dereceli kuraklık koşullarında diğer mısır varyetelerine göre daha yüksek prolin içeriğine sahip olduğu

görülmüştür. Buna karşılık, kuraklık stresine tepki olarak şeker mısırdaki prolin içeriği azalmış ve şiddetli kuraklıkta minimum 1,56 mmol g<sup>-1</sup> TA değerine ulaşmıştır.

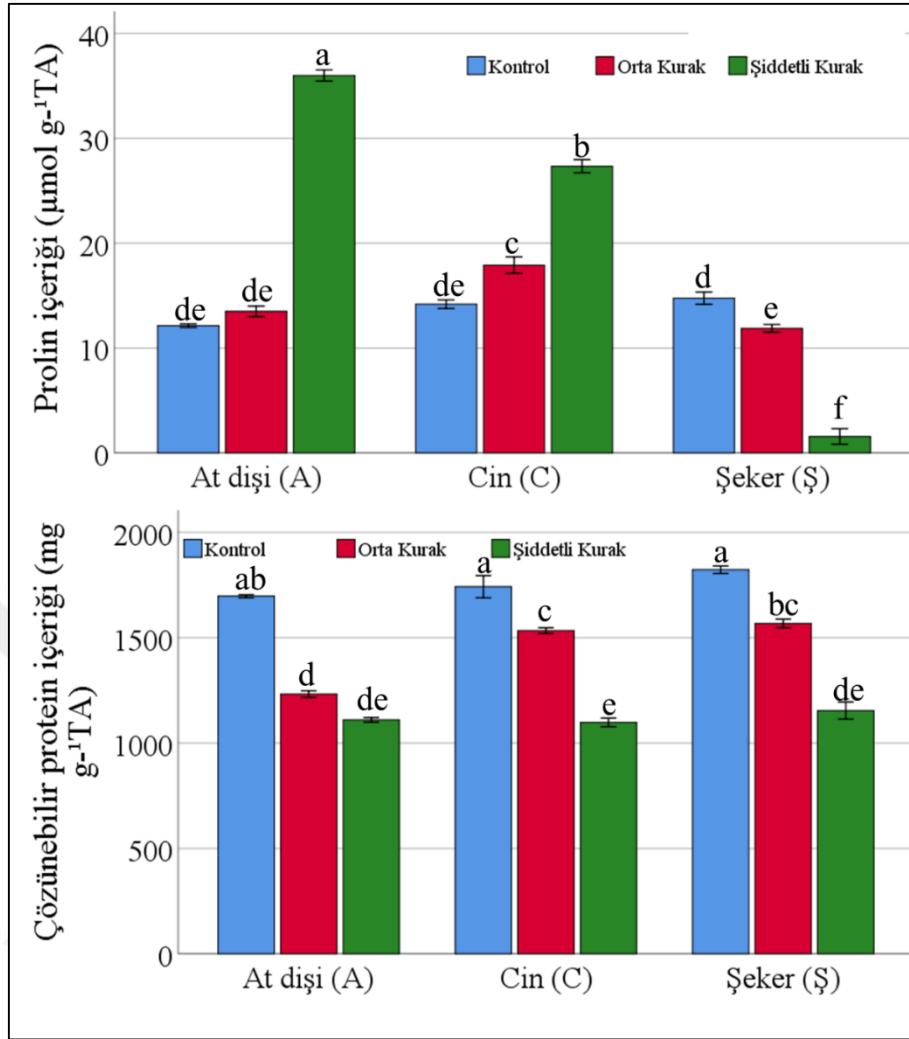
Çizelge 4.5. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının prolin ve çözünebilir protein içeriğine etkisini gösteren varyans analizi

| Varyasyon kaynağı     | SD | Prolin içeriği (KO) | Çözünebilir protein içeriği (KO) |
|-----------------------|----|---------------------|----------------------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 249.68**            | 66186**                          |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 173.33**            | 901878**                         |
| M × K                 | 4  | 323.84**            | 25507**                          |
| Hata                  | 18 | 0.93                | 2063                             |

\*\* = p ≤ 0,001, KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi

Mısır yapraklarının çözünebilir protein içeriği, tüm mısır varyetelerinde kuraklık stresinde azalmıştır. Tüm koşullar altında en yüksek protein içeriği şeker mısırdaki gözlenirken, en düşük olarak atdışi mısırdaki gözlenmiştir. Mısır yapraklarındaki çözünebilir protein içeriğindeki en büyük azalma, normal koşullarla karşılaştırıldığında orta derecede kuraklık stresi altındaki atdışi mısırdaki ve şiddetli kuraklık stresi altındaki şeker mısırında görülmüştür. En yüksek çözünebilir protein içeriği ise, orta derecede kuraklık stresiyle karşılaştırıldığında şiddetli kuraklık stresi altında cin mısırdaki ölçülmüştür (Şekil 4.5).

Su sıkıntısı çeken bitkilerde uyumlu çözünenler, ozmoprotektan görevi görür ve ozmotik düzeltmeye aracılık eder (Mukarram vd., 2021). Bunlardan serbest prolin, su eksikliği koşullarında yetiştirilen bitkilerde en bol bulunan bir ozmolittir. Sonuç olarak yüksek prolin seviyeleri su tutma kapasitesini artırabilir (Frimpong vd., 2021). Bu çalışmada su eksikliği, atdışi ve cin mısırının yapraklarındaki prolin içeriğini arttırmıştır (Şekil 4.5). Bu varyetelerin su kapsamı ve turgor kapasiteleri de yüksek bulunmuştur. Kuraklık stresi ile su ve turgor kaybı artan şeker mısırın prolin içeriğinin kuraklık stresi ile azalması bu bilgiyi desteklemektedir. Abdul Mohsin ve Farhood (2023), prolinin, su stresi koşullarının neden olduğu değişikliklere karşı güçlü direnç gösteren yapışkan bir su kabuğu görevi görerek bitkilerin su örtüsünü korumasına yardımcı olduğunu bildirmiştir.



Şekil 4.5. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin prolin ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  TA) ve çözünebilir protein ( $\text{mg g}^{-1}$  TA) içeriklerinin değişimi. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

Kuraklık stresi bitki proteinlerinde hem niteliksel hem de niceliksel değişikliklere neden olabilir. Çevresel değişiklikler altında büyüyen bitkiler, protein içeriğinde değişikliklere maruz kalır ve bu da çoğu durumda prolin içeriğindeki artışa bağlı olarak protein içeriğinde azalmaya yol açar. Temel olarak prolin birikiminin, bitkilerde strese bağlı protein hidrolizi veya protein sentezinin oksidatif inhibisyonu sonucu olduğu rapor edilmiştir (Mansour ve Salama, 2020). Bu çalışmada kuraklık stresi tüm mısır genotiplerinde çözünebilir protein içeriğinde azalmaya neden olmuştur. Prolin birikiminin yüksek olduğu atdişi mısırdaki protein içeriğindeki azalma daha az olmuştur (Şekil 4.5). Abiyotik stres koşulları altında, zararlı etkilerden kurtulan bitkiler, prolin gibi çözünen maddeleri biriktirerek hücresel düzeyde ozmotik potansiyeli artırma eğilimindedir (Öztürk vd. 2020).

Ancak kuraklık stresi altında prolin ve antioksidan enzim düzeyleri artarken toplam çözünebilir protein miktarının azaldığı rapor edilmiştir (Kosar vd., 2020).

#### 4.6. Bitkilerin Elektrolit Sızıntısı, Zararlanma Yüzdesi ve Membran Dayanıklılık İndeksleri

Bitkilerin elektrolit sızıntısı, zararlanma yüzdesi ve membran dayanıklılık indeksi varyans analizlerinin sonuçları (Çizelge 4.6), mısır varyeteleri arasında zararlanma yüzdesinde ve membran dayanıklılık indeksinde ve ayrıca kuraklık stresine yanıtta istatistiksel olarak anlamlı değişiklikler olduğunu göstermiştir. Mısır varyeteleri ile kuraklık stresi arasındaki interaksyonun önemsiz olduğu bulunmuştur.

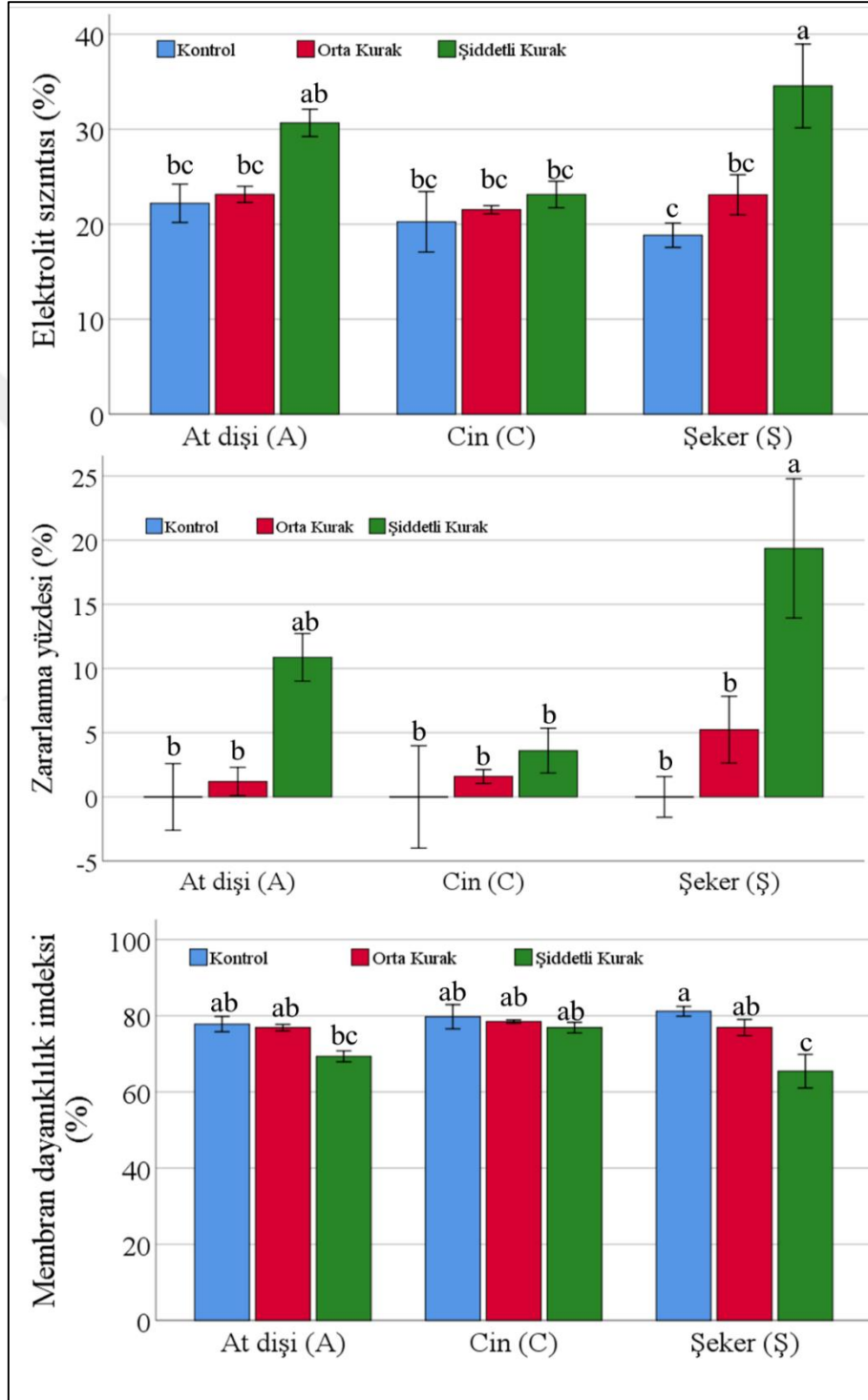
Çizelge 4.6. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının elektrolit sızıntısı, zararlanma yüzdesi ve membran dayanıklılık indeksine etkisini gösteren varyans analizi

| Varyasyon kaynağı     | SD | Elektrolit sızıntısı (KO) | Zararlanma yüzdesi (KO) | Membran dayanıklılık indeksi (KO) |
|-----------------------|----|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 42.92*                    | 96.77*                  | 42.92*                            |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 199.55**                  | 312.64**                | 199.55**                          |
| M × K                 | 4  | 34.69 <sup>öd</sup>       | 52.33 <sup>öd</sup>     | 34.69 <sup>öd</sup>               |
| Hata                  | 18 | 14.88                     | 23.13                   | 14.88                             |

\* =  $p \leq 0,05$ , \*\* =  $p \leq 0,001$ , öd = önemli değil, KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi

Çevresel stres etkenleri altında bitki zarları değişebilir, bu da geçirgenliğin artmasına ve bütünlüğün kaybolmasına yol açabilir (Blohina vd., 2003). Bu nedenle çeşitli dokulara verilen hasar, hücre zarlarının iyon taşınmasını düzenleme yeteneği incelenerek değerlendirilebilir. Yüksek elektrolit sızıntısı, su stresinin özellikle kuraklığa duyarlı bitkilerde oksidatif hasara neden olduğunu göstermektedir (Hasanuzzaman vd., 2013). Önceki araştırmalarla belirlendiği gibi (Valentovič vd., 2006; Anjum vd., 2017; Molla vd., 2023), bu çalışmada elektrolit sızıntısı değeri kuraklık stresinin şiddetiyle birlikte artmıştır (Şekil 4.6). Elektrolit sızıntısı değerleri normal sulama koşullarında %19-22 arasında değişirken, orta dereceli kuraklık stresinde %22-23 civarına yükselmiş, şiddetli kuraklık koşullarında ise şeker mısırdaki %34,5'e yükselmiştir. Orta ve şiddetli stres altında şeker mısırdaki elektrolit sızıntısındaki artışlar normal koşullarla karşılaştırıldığında sırasıyla %50

ve %84 civarında olurken, cin mısırındaki elektrolit sızıntısındaki artışlar minimum düzeyde olmuştur.



Şekil 4.6. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin elektrolit sızıntısı, zararlanma yüzdesi ve membran dayanıklılık indeksi (%) değişimi. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

Elektrolit sızıntısının da gösterdiği gibi, zararlanma yüzdesinin en yüksek derecesi (%19,36) şiddetli kuraklık stresine maruz kalan şeker mısırdaki gözlenmiştir. Tüm mısır varyetelerinde kuraklık stresinin şiddetiyle birlikte membran hasarı da artmıştır. Atıdı mısır orta derecede kuraklık stresinde en az zararı (%1,20) gösterirken, cin mısırdaki şiddetli kuraklık stresinde en az zararı (%3,60) göstermiştir (Şekil 4.6). Beklendiği gibi membran dayanıklılık indeksi, uygulanan stresin şiddetine göre bir düşüş göstermiştir. Membran dayanıklılık indeksi, %65,44'ten (şiddetli kuraklık stresindeki şeker mısırdaki) %81,16'ya (kontrol koşullarındaki şeker mısırdaki) kadar uzanan bir değer aralığı hesaplanmıştır. Cin mısırdaki membran dayanıklılık indeksi değerleri tüm koşullarda birbirine yakın bulunmuştur. En yüksek membran dayanıklılık indeksi, kontrol koşullarındaki şeker mısırdaki gözlenmesine rağmen, orta ve şiddetli kuraklık koşullarındaki cin mısırdaki bulunmuştur (Şekil 4.6).

Kuraklığın bitkiler üzerindeki etkisinin en basit ve ölçülebilir göstergesi, elektrolit sızıntısına göre hesaplanan membran dayanıklılık indeksidir (Rudolphi-Szydło vd., 2022). Bu indeksin yüksek değeri bitkilerde elektrolit sızıntısının düşük olduğunu, membran hasarının oluşmadığını ve yüksek membran dayanıklılık indeksine sahip genotiplerin yüksek kuraklık toleransını gösterir (Guizani vd., 2023; Yin vd., 2024). Bu çalışmada mısır genotiplerinin zararlanma yüzdesinin şiddetli kuraklık koşullarında kontrole göre daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 4.6). Ancak orta dereceli kuraklık koşullarında tüm mısır varyetelerinde membran dayanıklılık indeksi değerlerinin kontrole yakın olduğu görülmüştür. Şiddetli kuraklık koşullarında, yalnızca şeker mısır membran dayanıklılık indeksi değerlerinde kontrolle karşılaştırılabilir bir azalma sergilemiştir. Ancak yine de diğer genotiplere göre çok düşük bir değere ulaşamamıştır. Şiddetli kuraklık altında şeker mısırdaki membran dayanıklılık indeksi değerindeki daha fazla azalma, kontrol koşullarında daha yüksek değerlere sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

#### 4.7. Bitkilerin Malondealdehit ve Hidrojen Peroksit İçerikleri

Kuraklık stresindeki mısır bitkilerinde malondealdehit (MDA) ve hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) içerikleri varyeteler, kuraklık uygulamaları ve interaksyonları bakımından istatistiki olarak önemli varyasyon göstermiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının MDA ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğine etkisini gösteren varyans analizi

| Varyasyon kaynağı     | SD | MDA içeriği (KO) | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> içeriği (KO) |
|-----------------------|----|------------------|--------------------------------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 22.79**          | 1507.67**                                  |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 76.81**          | 341.75**                                   |
| M × K                 | 4  | 12.21**          | 11.74*                                     |
| Hata                  | 18 | 2.71             | 4.28                                       |

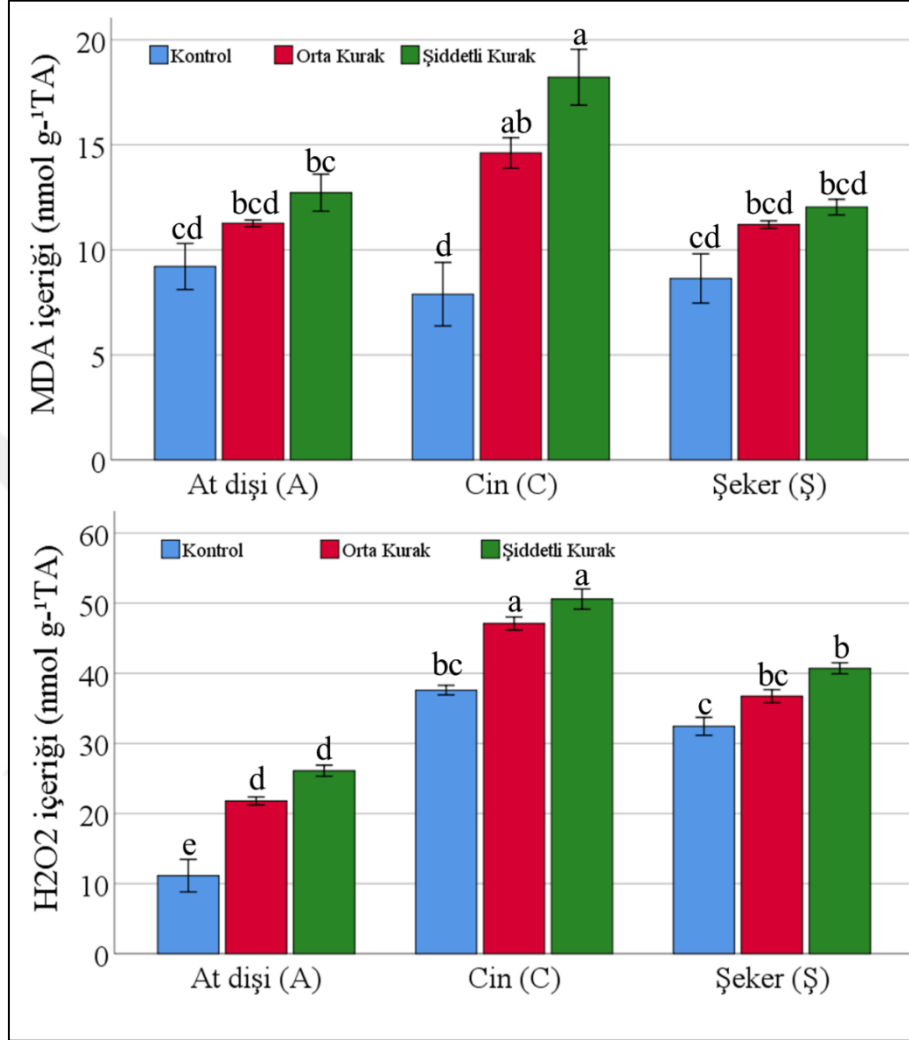
\* =  $p \leq 0,05$ , \*\* =  $p \leq 0,001$ , KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi

Bitkiler kuraklığa maruz kaldığında membran bütünlüğünde ve hücre sel yapıda azalmaya katkıda bulunan bir diğer faktör, lipid peroksidasyonunda artışa neden olan ROT'un varlığıdır (Ru vd., 2023). Lipid peroksidasyon seviyeleri (MDA içeriği), tüm mısır genotiplerinde kontrolde yaklaşık 7,89 - 9,21 nmol g<sup>-1</sup> TA idi (Şekil 4.7), ancak şiddetli kuraklık uygulamasının ardından cin mısırdaki 18 nmol g<sup>-1</sup> TA, atdışi ve şeker mısırdaki 12 nmol g<sup>-1</sup> TA'nın üzerine çıkmıştır. Cin mısırın MDA içeriğinin her iki kuraklık stresi koşullarında da diğerlerinden daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Mısırdaki MDA üretimi stresin türüne ve yoğunluğuna da bağlıdır. Zhang vd. (2014), ani kuraklık stresinde kademeli strese göre daha yüksek MDA seviyeleri gözlemlediklerini bildirmişlerdir. Cin mısır en düşük MDA değerlerine sahipken, atdışi mısır en yüksek MDA değerlerine sahipti. Mısır bitkileri orta derecede kuraklık stresine maruz bırakıldığında MDA değerleri atdışi mısırdaki %22,34, cin mısırında %85,30 ve şeker mısırında %29,73 oranında artış göstermiştir. Kuraklığın şiddeti arttıkça, MDA içeriği sırasıyla %7,42, %12,95 ve %24,63 artarak şeker mısırdaki 12,03 nmol g<sup>-1</sup> TA, atdışi mısırdaki 12,72 nmol g<sup>-1</sup> TA ve cin mısırdaki 18,22 nmol g<sup>-1</sup> TA değerine yükselmiştir.

Lipid peroksidasyonunun, mısır da dahil olmak üzere farklı bitkilerin duyarlı genotiplerinde daha yüksek olduğu bildirilmiştir; bu nedenle, strese tolerans için bir seçim kriteri olarak kullanışlı bir parametredir (Rao vd., 2013). Son zamanlarda, bazı toleranslı mısır genotiplerinde duyarlı genotiplere nazaran daha yüksek verimle birlikte daha düşük MDA değerleri bildirilmiştir (Rohman vd., 2018). Her iki stres şiddetinde de en yüksek artış cin mısırdaki görülmüştür. Atdışi mısırdaki normal şartlarda MDA içeriği yüksek olduğundan stres koşullarındaki artış diğer varyetelere göre daha düşük olmuştur. Bununla birlikte, şeker

mısırın MDA içeriği, şiddetli kuraklıkta orta kuraklığa kıyasla daha düşük bir artış göstermiştir.



Şekil 4.7. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin malondialdehit (nmol g<sup>-1</sup> TA) ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (µmol g<sup>-1</sup> TA) içeriği değişimi. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

En düşük H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> seviyeleri atdişi mısırdaki gözlenirken, en yüksek seviyeler tüm koşullar altında cin mısırdaki gözlenmiştir (Şekil 4.7). Düşük seviyelere rağmen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğindeki artış, diğer varyetelerle karşılaştırıldığında kuraklık stresinin yoğunlaşması nedeniyle atdişi mısırdaki daha belirgin olmuştur. Kuraklık stresinin yokluğunda, atdişi mısırın H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği 11,14 nmol g<sup>-1</sup> TA, cin mısırınki 37,59 nmol g<sup>-1</sup> TA ve şeker mısırınki 32,44 nmol g<sup>-1</sup> TA olmuştur. Orta derecede kuraklık stresi uygulandığında atdişi mısırın H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği 10,65 birim artmıştır. Bu artış şeker mısırdaki 4,30 birimdir. Şiddetli kuraklık

koşullarında cin mısırdaki  $H_2O_2$  içeriği normal koşullara göre 13 birim artmıştır. Buna karşılık, kuraklık orta dereceden şiddetliye doğru değiştiğinde sadece 3,49 birim artmıştır, bu da varyeteler arasında en düşük artışı temsil etmektedir.

$H_2O_2$ , çok sayıda sinyal yolunda yer almasına rağmen stres koşullarında aşırı biriktiğinde toksik hale gelir ve konsantrasyonunu toksisite eşiğinin altında tutacak şekilde uzaklaştırılmadığında hücresel hasara neden olur (Wang vd., 2024).  $H_2O_2$  konsantrasyonu arttıkça lipidler ve proteinlerle reaksiyona girerek lipidlerin oksidasyonuna ve hücre zarının zarar görmesine neden olur. MDA içeriğinde olduğu gibi lipid peroksidasyonunun ve membran hasarının düzeyini gösterir. Ancak MDA içeriği kuraklık koşullarındaki su kaybıyla daha pozitif ilişkilidir. Stres koşullarında MDA ve  $H_2O_2$  içerikleri düşük olan genotiplerin toleranslı olduğu rapor edilmiştir (Singh vd., 2022). Malondealdehit ve  $H_2O_2$  içerikleri düşük olan atdışi mısırın diğerlerine göre daha toleranslı olduğu bu çalışma için söylenebilir.

#### 4.8. Bitkilerin Antioksidan Enzim Aktiviteleri

Kuraklık stresine maruz kalan mısır bitkilerinin antioksidan enzim (SOD, APX ve CAT) aktivitelerinde önemli bir değişiklik gözlenmiştir. Mısır varyeteleri ile kuraklık stresi arasındaki interaksiyon SOD aktivitesi açısından anlamlı bulunmamıştır (Çizelge 4.8).

Çizelge 4.8. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının antioksidan enzim (SOD, APX, CAT) aktivitelerine etkisini gösteren varyans analizi

| Varyasyon kaynağı     | SD | SOD aktivitesi (KO) | APX aktivitesi (KO) | CAT aktivitesi (KO) |
|-----------------------|----|---------------------|---------------------|---------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 0.02**              | 0.46**              | 0.05**              |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 0.06**              | 0.43**              | 0.40**              |
| M × K                 | 4  | 0.01 <sup>öd</sup>  | 0.10**              | 0.02**              |
| Hata                  | 18 | 0.003               | 0.004               | 0.001               |

\*\* =  $p \leq 0,001$ , öd = önemli değil, KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi

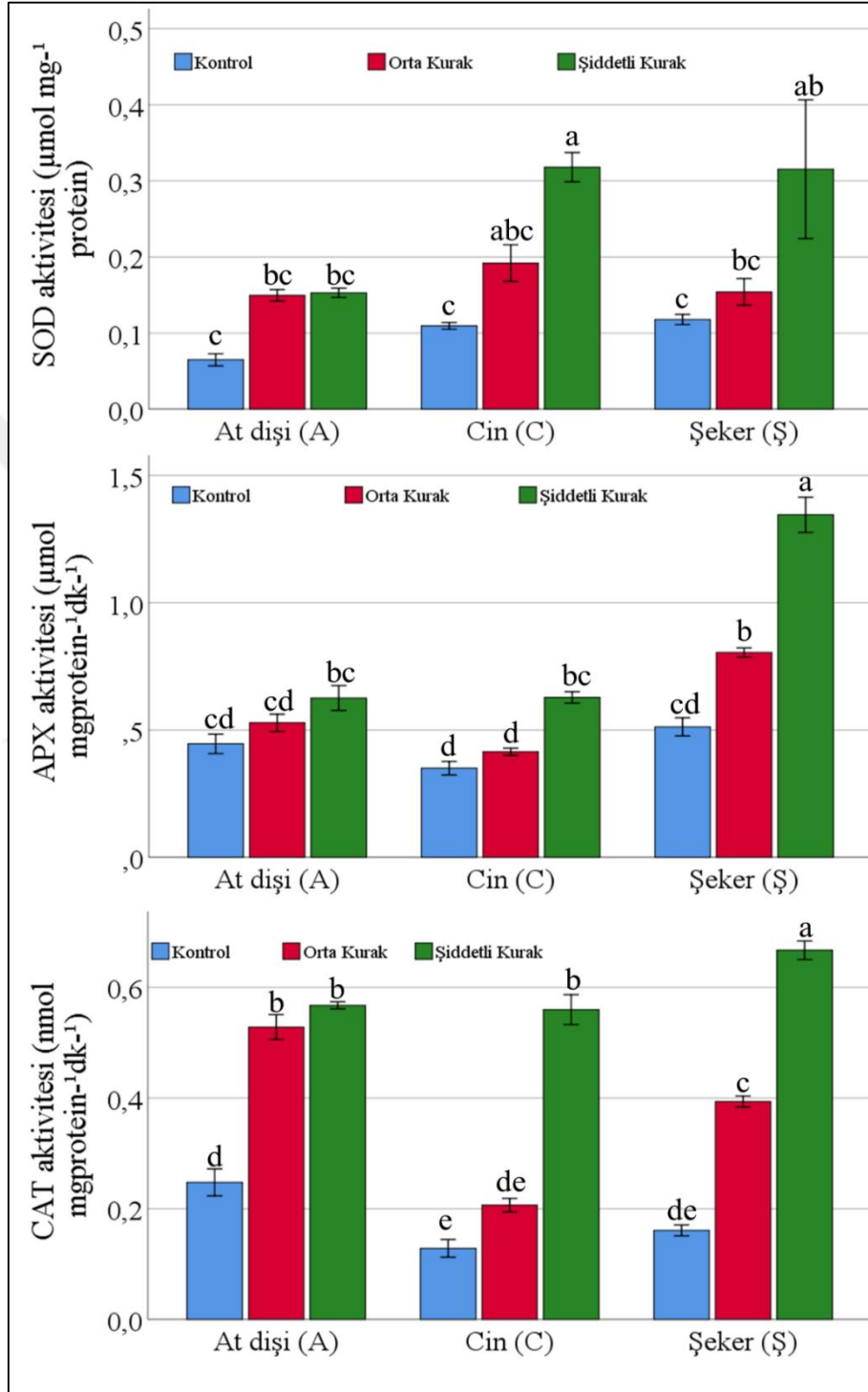
Su stresi toleransı, ROT üretimi ve bunların çeşitli antioksidan türlerinin üretimi ile ortadan kaldırılması arasındaki hassas bir denge yoluyla sağlanan hücresel bir homeostatiktir. Bu hassas denge herhangi bir stres nedeniyle bozulduğunda, ROT birikimi

artar. Dengeyi sağlamak ve artan ROT birikiminin neden olduğu ozmotik stresin şiddetli etkileriyle başa çıkmak için bitki, çeşitli enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidanların aktivitesini artırmaya başlar (Yousaf vd., 2023). İncelenen tüm antioksidan enzimlerin, tüm mısır varyetelerinde kuraklık stresinin şiddetinde paralel bir artış sergilediği bulunmuştur (Şekil 4.8). SOD enzim aktivitelerindeki en büyük artış, orta derecede kuraklık stresi altındaki atdışi mısır bitkilerinde gözlenmiştir. Şiddetli kuraklık koşullarında en yüksek SOD aktivitesi cin ve şeker mısırdaki ölçülmüştür. Atdışi mısır, hem orta hem de şiddetli kuraklık koşullarında benzer SOD aktivitesi ortaya çıkarmıştır.

Mısır bitkilerinin APX aktivitelerindeki artışlar, kontrol koşullarıyla karşılaştırıldığında orta derecede kuraklık koşullarında atdışi ve cin mısırlarında birbirine yakın bulunmuştur. Ancak şeker mısırdaki artış iki kat daha fazlaydı. Şiddetli kuraklık, kontrol koşullarına kıyasla şeker mısırdaki APX aktivitesinde 2,6 kat artışla sonuçlanırken, cin mısırdaki 1,8 kat ve atdışi mısırdaki 1,4 kat artmıştır (Şekil 4.8). CAT aktivitesi orta derecede kuraklık koşullarında atdışi ve şeker mısırlarında hızlı bir artış gösterirken, cin mısırdaki artış yavaş artmıştır. Şiddetli kuraklık durumunda en yüksek CAT aktivitesi şeker mısırdaki gözlenmiştir. Şiddetli kuraklıkta, CAT aktivitesi şeker ve cin mısırlarında kontrole kıyasla dört kattan fazla artmıştır. Orta dereceden şiddetli kuraklık stresine geçişte, cin mısırdaki CAT aktivitesi 2,7 kat artmıştır. Artışın büyüklüğü önemli olmasına rağmen, CAT aktivitesi cin mısırdaki en düşük seviyede idi (Şekil 4.8).

Çalışmada incelenen tüm antioksidan enzim aktiviteleri en yüksek artış şeker mısırdaki göstermiştir. Ancak şeker mısırın normal sulama koşullarında da SOD ve APX aktiviteleri yüksekti. Şiddetli kuraklık stresi altında tüm mısır genotiplerinde tüm antioksidan enzimler en yüksek düzeye ulaşmıştır. Kuraklık stresinin başlamasıyla birlikte antioksidan sistemin derhal aktive edilmesi gerekmektedir. Bu antioksidan enzimler, bitkileri ROT'un neden olduğu oksidatif hasardan korur ve stresli koşullar altında ROT üretimi ile temizleme arasındaki dengeyi korur (Rajput vd., 2021). Ayrıca hücrelerde ROT'un neden olduğu oksidatif hasarın düzeyi ile antioksidanların aktivitesi arasında güçlü bir korelasyon vardır. Genotipin kuraklık stresine karşı direnci veya duyarlılığı, antioksidan ve ROT üretimi arasındaki dengeyle belirlenir (Anjum vd., 2016). Toleranslı genotipler kuraklık stresi altında daha az  $H_2O_2$  biriktirir, bu da daha az şiddetli oksidatif hasara işaret etmektedir. Kuraklık koşulları altında atdışi mısırdaki düşük düzeylerde olan  $H_2O_2$  içeriği, bu

genotipin yaprak dokularındaki APX, CAT ve SOD aktivitelerinin de düşüklüğü ile sonuçlanmıştır.



Şekil 4.8. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin antioksidan enzim (SOD, APX ve CAT) aktivitelerinin değişimi. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

#### 4.9. Bitkilerin HSP70 ve HSP90 Gen ve Protein Ekspresyon Seviyeleri

HSP70 geninin ekspresyonu mısır varyeteleri arasında farklılık göstermiştir ancak kuraklık stresi veya mısır varyetesi  $\times$  kuraklık stresi interaksyonu açısından anlamlı değildir. Buna karşılık, HSP90 geninin ifadesi tüm araştırma varyantları için istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Mısır bitkilerinde kuraklık uygulamalarının HSP70 ve HSP90 gen ekspresyonlarına etkisini gösteren varyans analizi

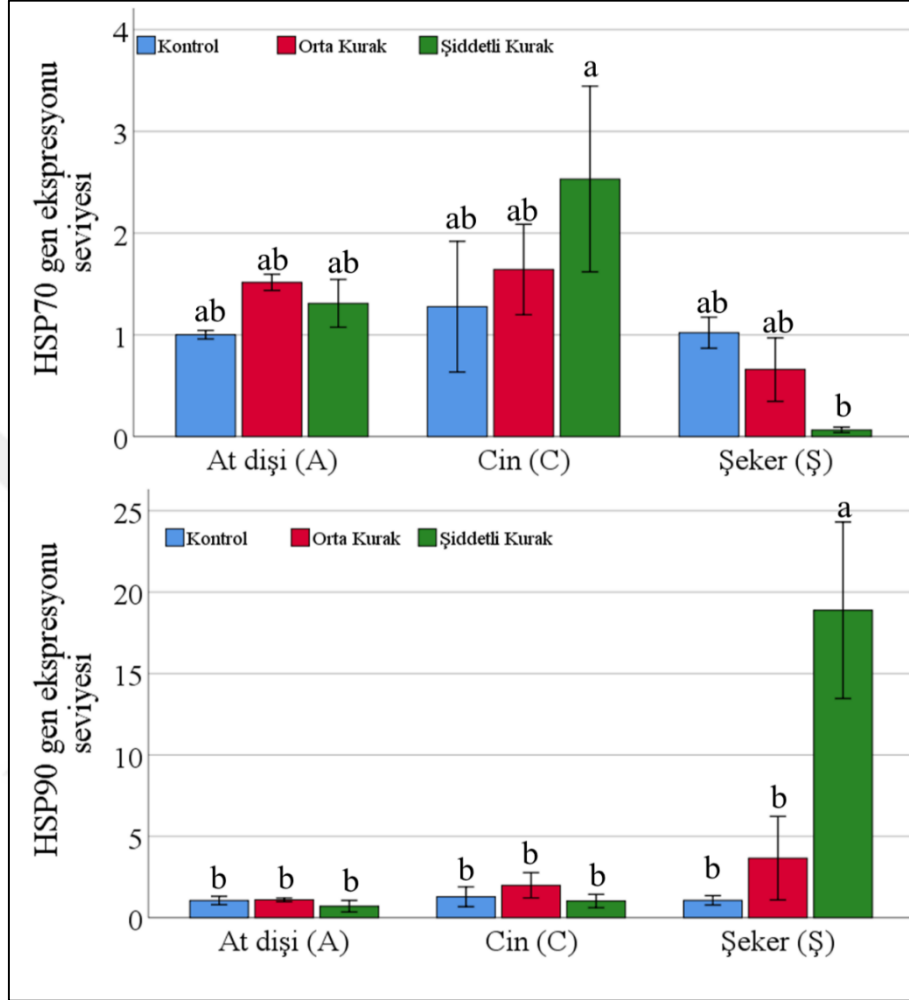
| Varyasyon kaynağı     | SD | HSP70 gen ekspresyonu (KO) | HSP90 gen ekspresyonu (KO) |
|-----------------------|----|----------------------------|----------------------------|
| Mısır varyeteleri (M) | 2  | 3.44**                     | 134.30**                   |
| Kuraklık stresi (K)   | 2  | 0.11 <sup>öd</sup>         | 83.28**                    |
| M $\times$ K          | 4  | 1.02 <sup>öd</sup>         | 97.86**                    |
| Hata                  | 18 | 0.54                       | 12.46                      |

\*\* =  $p \leq 0,001$ , öd = önemli değil, KO= kareler ortalaması, SD= serbestlik derecesi

HSP70 geninin ekspresyon seviyeleri, kuraklık stresi koşulları altında mısır varyeteleri arasında dikkate değer farklılıklar olduğunu göstermiştir (Şekil 4.9). Atdışi mısırdaki ifade düzeyi orta derecede kuraklık stresinde 1,00'den 1,52'ye çıkmış, şiddetli kuraklıkta ise 1,31'e düşmüştür. Cin mısırdaki kuraklık şiddetinin artmasıyla birlikte gen ekspresyon seviyelerinde kademeli bir artış gerçekleşmiştir. Ekspresyon seviyeleri, tüm koşullar altında diğer mısır varyetelerinde gözlemlenenlerden biraz daha yüksek bulunmuştur. Buna karşılık, şeker mısırdaki HSP70 gen ekspresyonu seviyesi, kuraklığın şiddeti arttıkça düşüş göstererek oldukça düşük bir seviyeye ulaşmıştır.

HSP90'ın gen ekspresyonu seviyesi şiddetli kuraklık koşulları altında şeker mısırdaki önemli ölçüde yükselmiş ve aşırı ifade edilmiştir. Atdışi mısırdaki gen ekspresyon düzeyi normal koşullar ve orta dereceli kuraklık altında yaklaşık 1,00'den şiddetli kuraklık altında 0,71'e düşmüştür. Cin mısırdaki HSP90 ekspresyonu normal koşullarla karşılaştırıldığında orta dereceli kuraklık varlığında 1,5 kat artmış, şiddetli kuraklık varlığında ise 0,8 kat azalmıştır. Şeker mısırdaki ekspresyon seviyeleri, kuraklık şiddetinin ilerlemesiyle birlikte belirgin bir artış göstermiştir. Şeker mısırdaki HSP90 gen ekspresyonu, normal koşullara

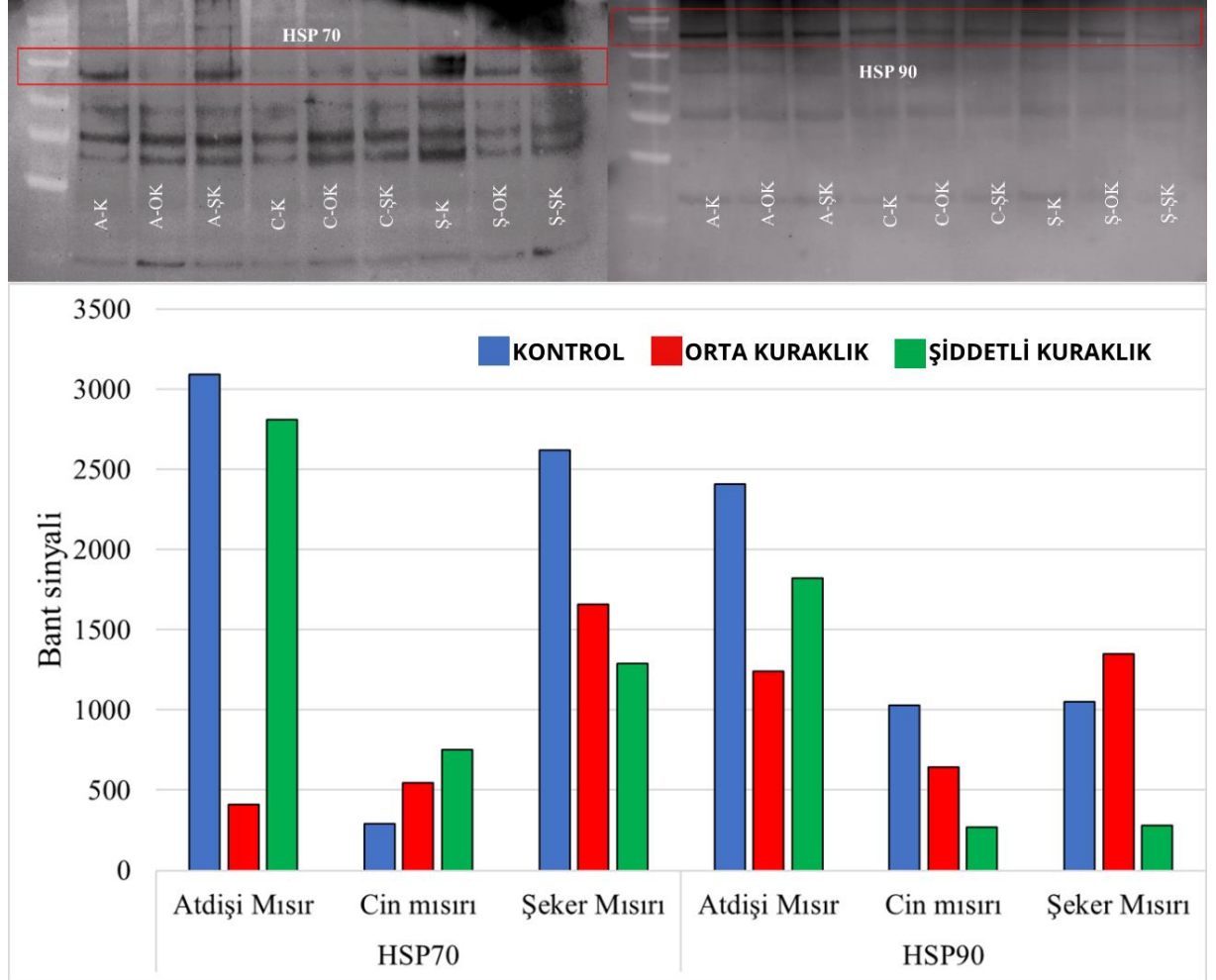
göre orta dereceli kuraklık koşullarında 3,4 kat, şiddetli kuraklık koşullarında ise 17,7 kat artış göstermiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin HSP70 ve HSP90 gen ekspresyonlarının değişimi. Grafik üzerindeki barlar standart hatayı göstermektedir.

Western blot analizi, HSP70 proteininin bant yoğunluğunun normal koşullar altında atdişi mısırdaki en yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır (Şekil 4.10). Bir sonraki en yüksek HSP70 proteini seviyesi şeker mısırdaki gözlemlenmiştir, ancak bu cin mısırdaki oldukça düşük bulunmuştur. Orta dereceli kuraklık altında, HSP70'in bant yoğunluğunun atdişi mısır ve cin mısırdaki nispeten benzer olduğu, şeker mısırdaki ise daha yüksek bir seviye sergilediği bulunmuştur. Şiddetli kuraklıkta HSP70'in bant yoğunluğu en büyükten en küçüğe doğru atdişi, şeker ve cin mısır olarak sıralanmıştır. Kuraklık stresi altında HSP70 protein ekspresyonundaki değişikliklerin tezahürü, mısır varyeteleri arasında farklılık göstermiştir.

HSP70 ekspresyonu cin mısırdaki kuraklıkla birlikte kademeli bir artışa, şeker mısırdaki ise düşüşe işaret etmiştir.



Şekil 4.10. Kuraklık stresi altında mısır bitkilerinin HSP70 ve HSP90 protein ekspresyonlarının değişimi.

Atdışi mısırdaki tipik olarak yüksek olan HSP90 protein bandının yoğunluğunun cin mısır ve şeker mısırdaki eşdeğer olduğu ve atdışi mısırdaki gözlenenin yaklaşık yarısı olduğu bulunmuştur. Orta derecede kuraklık stresi, atdışi ve cin mısırdaki kontrol koşullarına kıyasla HSP90 protein miktarında azalmaya neden olurken, şeker mısırdaki artış gözlenmiştir. Şiddetli kuraklık stresine tepki olarak atdışi mısırdaki HSP90 protein ekspresyonu, normal koşullar altında gözlemlenen seviyelerin altında kalmasına rağmen kademeli olarak artmıştır. Ancak cin ve şeker mısırdaki kayda değer bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.10).

Kuraklık stresinin bitki proteininin normal miktarını ve kalitesini etkilediği bilinmektedir. Kuraklığın neden olduğu dehidrasyon, HSP'ler de dahil olmak üzere stresle ilişkili proteinleri tetikler. Bitki stres tepkilerinin birincil düzenleyicileri, tıpkı antioksidanlar gibi HSP'leri kodlayan genlerdir. HSP'ler, bitki büyümesi için yüksek sıcaklıklarda konsantrasyonu önemli ölçüde artan proteinler olarak karakterize edilmiştir; ancak son raporlar HSP'lerin yeni oluşan proteinlerin katlanmasına veya yanlış katlanan proteinlerin durdurulmasına yardımcı olan proteinler olduğunu öne sürmektedir (Khan ve Shahwar, 2020). Li vd. (2021), HSP70, HSP90 ve küçük HSP ailesi de dahil olmak üzere mısırdaki HSP'lerin çoğunun şiddetli kuraklık stresi altında arttığını bildirmiştir. Bu çalışmada birçok stres koşulunda önemi vurgulanan HSP70 ve HSP90'ın gerçek zamanlı PCR ile transkripsiyon düzeyinde ve Western blot yöntemiyle translasyon düzeyinde tespiti yapılmıştır. HSP70 geninin ekspresyonunun, atdışi ve cin mısırlarında kuraklık stresi nedeniyle yukarı regüle edildiği, şeker mısırdaki ise aşağı regüle edildiği bulunmuştur. HSP90 geni ile ilgili olarak atdışi ve cin mısırlarında kuraklık stresi ile ekspresyon seviyesinde fazla bir değişiklik olmamıştır. Ancak özellikle şiddetli kuraklıkta şeker mısırdaki aşırı eksprese edildiği gözlenmiştir (Şekil 4.9). Western Blot analizinin atdışi mısırdaki gerçek zamanlı PCR analiziyle karşılaştırıldığında farklı sonuçlar ürettiği görülmüştür (Şekil 4.10). HSP70 ve HSP90 ekspresyonunun kontrol koşullarında kuraklık koşullarına göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. HSP70 ve HSP90'ın ayrıca bitkilerin normal gelişiminde önemli bir rol oynadığı gösterilmiştir. Bu proteinler normal, strese maruz kalmamış hücrelerde önemli seviyelerde bulunur veya hücre döngüsünün belirli aşamalarında veya stres yokluğunda gelişim sırasında sitoplazmada muhafaza edilir (Li ve Howell, 2021). Stres yokluğunda translasyon düzeyinde HSP70 ve HSP90'ın yüksek ifadesi yukarıda belirtilen bilgilere atfedilebilir.

Cin ve şeker mısırdaki HSP70 ekspresyonunun her iki analizde de benzer olduğu ve sonuçların birbirini desteklediği bulunmuştur. HSP70, strese yanıt olarak cin mısırdaki yukarı doğru düzenlenirken, şeker mısırdaki aşağı doğru düzenlenmiştir. HSP70'ler şaperon olarak sınıflandırılır ve bir dizi hayati işlevi yerine getirir. Bunlar arasında antioksidan sistemin işleyişinin teşvik edilmesi, aşırı ROS'un veya stres altında hasar görmüş proteinlerin ortadan kaldırılması ve yeni üretilen proteinlerin doğru şekilde katlanmasına yardımcı olunması yer alır (Ul Hak vd., 2019). Daha önceki çalışmalarda HSP70'in artışı çeltik, *Arabidopsis* ve mısırdaki kuraklık toleransı ile ilişkilendirilmiştir (Hu vd., 2010; Pulido vd., 2017; Devarajan

vd., 2021; Li vd., 2021). Kuraklık stresine tepki olarak ekspresyon seviyelerinde bir azalma olduğunu gösteren atdışı mısırdaki HSP70 bulgularına benzer şekilde, HSP90 ekspresyonunun orta dereceli kuraklığa göre şiddetli kuraklık koşullarında yukarı doğru düzenlendiği bulunmuştur. Kuraklık stresinde aşağı yönlü bir düzenleme sergileyen cin mısırdan farklı olarak şeker mısır, orta dereceli kuraklıkta yukarı yönlü, şiddetli kuraklıkta ise aşağı yönlü bir düzenleme sergilemiştir. Önceki çalışmalar, mısır bitkilerinde HSP90 geni ile kuraklık toleransı arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermiştir (Li ve Howell, 2021; Li vd., 2021a, b, Liu vd., 2021). HSP genlerinin ekspresyonunun hem transkripsiyonel (mRNA) hem de translasyon (protein) seviyelerinde kontrole tabi olduğu iyi bilinmektedir. Sonuç olarak, iki yöntemde gözlemlenen farklı sonuçların, transkripsiyon sonrası düzenleyici mekanizmalara atfedilebileceğinin farkına varmak önemlidir.

#### **4.10. İncelenen Parametreler Arasındaki Korelasyonlar**

Araştırmada incelenen parametreler arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla yapılan iki yönlü Pearson korelasyon analizi sonuçları Şekil 4.11'de sunulmuştur. Çizelgede görüldüğü gibi kırmızı renkle işaretlenen parametreler arasında negatif ve önemli, mavi renkle işaretlenenler arasında ise pozitif ve önemli ilişkiler bulunmaktadır. İlgili renklerin koyuluk veya açıklık derecesi, söz konusu değişkenlerin göreceli öneminin vurgulanmasına işaret etmektedir. Özellikle HSP70 gen ekspresyonu ile prolin içeriği arasında pozitif ve oldukça anlamlı bir korelasyon bulunurken, HSP70 gen ekspresyonu ile APX aktivitesi arasında negatif ve anlamlı bir korelasyon bulunmaktadır. HSP90 geninin ekspresyonunun turgor kaybı, elektrolit sızıntısı, zararlanma yüzdesi, SOD, APX ve CAT aktiviteleriyle pozitif ve anlamlı düzeyde ilişkili olduğu bulunmuştur. Tersine, membran dayanıklılık indeksi, yaprak oransal su kapsamı ve prolin ile negatif ve anlamlı bir korelasyon bulunmuştur.

Turgor kaybı, elektrolit sızıntısı, zararlanma yüzdesi, MDA ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği ve antioksidan enzim aktiviteleri ile bitki boyu, yaprak alanı, klorofil içeriği, bitki yaş ve kuru ağırlıkları arasında negatif ve önemli korelasyonlar bulunmuştur (Şekil 4.11). Bu bulgular, bitkilerin kuraklıktan zarar görme derecesi ile bitki verimini etkileyen parametrelerin ters orantılı değiştiğini ve söz konusu özelliklerin kuraklık toleransının belirlemede etkili olduğuna işaret etmektedir.

|       | YA     | KLR    | BYA    | BKA    | YOSK   | TK      | PRO    | PRT     | ES      | ZY      | MDİ     | MDA     | H2O2    | SOD     | APX     | CAT     | HSP70  | HSP90   |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| BB    | 0,89** | 0,48*  | 0,92** | 0,84** | 0,68** | -0,67** | -0,39* | 0,84**  | -0,49** | -0,40*  | 0,49**  | -0,69** | -0,31   | -0,57** | -0,25   | -0,66** | -0,28  | -0,21   |
| YA    |        | 0,63** | 0,88** | 0,90** | 0,76** | -0,75** | -0,38* | 0,90**  | -0,61** | -0,57** | 0,61**  | -0,66** | -0,37   | -0,64** | -0,50** | -0,82** | -0,11  | -0,36   |
| KLR   |        |        | 0,60** | 0,66** | 0,59** | -0,57** | -0,14  | 0,56**  | -0,29   | -0,40*  | 0,29    | -0,56** | -0,84** | -0,70** | -0,51** | -0,47*  | -0,14  | -0,34   |
| BYA   |        |        |        | 0,96** | 0,80** | -0,79** | -0,32  | 0,88**  | -0,55** | -0,50** | 0,55**  | -0,70** | -0,41*  | -0,66** | -0,40*  | -0,73** | -0,24  | -0,27   |
| BKA   |        |        |        |        | 0,83** | -0,82** | -0,35  | 0,85**  | -0,52** | -0,50** | 0,53**  | -0,73** | -0,47*  | -0,68** | -0,47*  | -0,75** | -0,15  | -0,29   |
| YOSK  |        |        |        |        |        | -0,99** | 0,14   | 0,65**  | -0,61** | -0,64** | 0,61**  | -0,56** | -0,47*  | -0,68** | -0,71** | -0,66** | 0,08   | -0,61** |
| TK    |        |        |        |        |        |         | -0,14  | -0,63** | 0,61**  | 0,64**  | -0,61** | 0,56**  | 0,48*   | 0,70**  | 0,69**  | 0,64**  | -0,07  | 0,65**  |
| PRO   |        |        |        |        |        |         |        | -0,35   | -0,03   | -0,12   | 0,03    | 0,42*   | 0,06    | 0,00    | -0,41*  | 0,13    | 0,50** | -0,56** |
| PRT   |        |        |        |        |        |         |        |         | -0,58** | -0,51** | 0,58**  | -0,62** | -0,21   | -0,63** | -0,50** | -0,93** | -0,17  | -0,29   |
| ES    |        |        |        |        |        |         |        |         |         | 0,97**  | -1,00*  | 0,20    | 0,02    | 0,35    | 0,65**  | 0,64**  | -0,16  | 0,54**  |
| ZY    |        |        |        |        |        |         |        |         |         |         | -0,97** | 0,19    | 0,16    | 0,41*   | 0,74**  | 0,60**  | -0,21  | 0,61**  |
| MDİ   |        |        |        |        |        |         |        |         |         |         |         | -0,20   | -0,02   | -0,35   | -0,65** | -0,63** | 0,16   | -0,54** |
| MDA   |        |        |        |        |        |         |        |         |         |         |         |         | 0,54**  | 0,61**  | 0,16    | 0,50**  | 0,29   | 0,02    |
| H2O2  |        |        |        |        |        |         |        |         |         |         |         |         |         | 0,60**  | 0,22    | 0,09    | 0,21   | 0,21    |
| SOD   |        |        |        |        |        |         |        |         |         |         |         |         |         |         | 0,58**  | 0,58**  | 0,09   | 0,61**  |
| APX   |        |        |        |        |        |         |        |         |         |         |         |         |         |         |         | 0,70**  | -0,41* | 0,79**  |
| CAT   |        |        |        |        |        |         |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         | -0,07  | 0,44*   |
| HSP70 |        |        |        |        |        |         |        |         |         |         |         |         |         |         |         |         |        | -0,44*  |

Şekil 4.11. Araştırmada incelenen özellikler arasındaki Pearson korelasyon katsayıları

\* =  $p \leq 0.05$  (açık kırmızı renk negatif, açık mavi renk pozitif), \*\* =  $p \leq 0.001$  (koyu kırmızı negatif, koyu mavi pozitif), önemsiz olanlar işaretlenmedi.)

Mısır bitkisinde kuraklık stresinin bir sonucu olarak ortaya çıkan morfolojik, fizyolojik ve moleküler mekanizmalar, onun strese maruz kalma ve tolerans derecesini belirlemeye yarar ve bunlar birbiriyle ilişkilidir. Zararlanma yüzdesi, turgor kaybı ve MDA içeriği ile antioksidan enzim aktiviteleri ve HSP90 gen ekspresyonu arasındaki pozitif korelasyon (Çizelge 4.10), stresin olumsuz etkilerine yanıt olarak bitkinin savunma mekanizmasının aktive olduğunu göstermektedir. MDA seviyelerindeki artışın strese bağlı hasarın göstergesi olduğuna dair geleneksel anlayışa rağmen, lipid peroksidasyonundaki artışın hücrenin transkripsiyonel profilini de değiştirebileceği gösterilmiştir (Zhang vd., 2024). Üstelik son araştırmalar, MDA'nın bitkilerde stres sinyali veren bir molekül olarak işlev görebildiğini, ısı şoku/dehidrasyon ve antioksidan mekanizmayla ilişkili genleri aktive ettiğini öne sürmüştür (Morales ve Munné –Bosch, 2019). HSP70 geninin ekspresyonunun prolin içeriği ve APX enziminin aktivitesi ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Buna karşılık HSP90 geninin ekspresyonu, MDA,  $H_2O_2$  ve çözünebilir protein içeriği dışındaki tüm özelliklerle ilişkiliydi. Bu çalışmada HSP90 geninin ekspresyonu ile HSP70 geninin ekspresyonu arasında negatif bir korelasyonun tespit edilmesi de dikkat çekicidir. Her HSP sınıfı farklı rollere sahip üyelerden oluşur. Bununla birlikte, entegre HSP mekanizmasının temel bir bileşeni, farklı HSP ağları arasındaki işbirliğidir (Wang vd., 2004). Stresli koşullara yanıt olarak HSP'ler, sinyal molekülleri olarak ROT'u kullanır ve böylece proteinlerin

katlanmasını önler. Daha önceki araştırmalar HSP'ler ile bitkilerin ROT'a verdiği tepkiler arasında karmaşık ilişkiler olduğunu göstermiştir (Ding vd., 2019; Singh vd., 2019). Mısırdaki stres toleransını açıklığa kavuşturmak için Li vd. (2021), gelecekteki çalışmaların HSP'ler ve diğer stres yanıt sistemleri arasındaki etkileşimleri incelemesi gerektiğini öne sürmüştür. Bu araştırmanın sonuçları, halen araştırılmakta olan etkileşimlere yeni cevaplar sağlayabilir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kuraklık stresi mısır yetiştiriciliğinde en zararlı çevresel streslerden birini temsil etmektedir. Bu çalışma, üç mısır varyetesinin kuraklığa toleranslarını belirlemek için vejetatif büyüme döneminde kuraklığa tepkilerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Hipotez, farklı toprak nem seviyelerinin morfolojik ve fizyolojik bitki özelliklerini ve HSP70 ve HSP90 ifadelerini transkripsiyonel ve translasyonel seviyede etkileyeceği ve kuraklığa dayanıklı olduğu düşünülen mısır varyetelerinin kuraklık stresine daha olumlu yanıt vereceği yönündeydi. Bitki boyu, yaprak alanı ve bitki ağırlığındaki azalmalar kuraklığın şiddetine göre değişmekle birlikte, atdışi mısırdaki genel olarak daha düşük olmuştur. Ek olarak atdışi mısır tüm koşullar altında en yüksek klorofil içeriğine sahiptir. Cin mısırdaki ise klorofil içeriğinde daha kabul edilebilir azalmalar ve elektrolit sızıntısında artışlar görülmüştür. Ancak şeker mısır morfolojik özellikler ve klorofil içeriği yönünden olumsuz özellikler sergilemiştir.

Bu çalışma, orta ve şiddetli kuraklık stresinin atdışi, cin ve şeker mısır varyetelerinde fizyolojik, enzimatik ve moleküler özellikleri değiştirdiğini ortaya çıkarmıştır. Atdışi mısırın kuraklık stresine karşı daha yüksek toleransı, diğer varyetelerle karşılaştırıldığında korunmuş su içeriği, yüksek prolin birikimi ve artan antioksidan aktiviteleri ve daha düşük lipid peroksidasyonu ile ilişkilidir. Özellikle şiddetli kuraklık koşullarında şeker mısırdaki MDA ve  $H_2O_2$  içeriğindeki artışlara yanıt olarak yüksek membran hasarı, su ve turgor kaybı, artan enzim aktiviteleri ve HSP90 gen ekspresyonu, onun stresten yoğun şekilde etkilendiğini göstermektedir. Cin mısır diğer iki varyetenin ortasında bir tolerans göstermiştir. Sonuçlar, mısır varyetelerinin farklı morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal, enzimatik ve moleküler tepkilerinin kuraklığın şiddetine bağlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca bulgularımız, orta ve şiddetli kuraklık stresi arasında farklı transkripsiyonel ve translasyonel sistemlerin mevcut olduğunu göstermektedir.

Analiz edilen özelliklere dayanarak çalışma, atdışi mısırın kuraklığa tolerans açısından en yüksek potansiyele sahip olduğunu, bunu azalan sırayla cin mısır ve şeker mısırın izlediğini ortaya çıkarmıştır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdul Mohsin, A. M., Farhood, A. N., (2023). *Drought stress effects on APETALA2 (AP2) gene expression, physiological, and yield traits of maize (Zea mays L.)*. Sabrao J Breed Genet, 55(6), 2181-2194. <http://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.6.29>
- Abraham-Juárez, M. J. (2019). *Maize protein extraction for different downstream applications*. Bio-101, e3241. <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.3241>
- Ackerly, D., Knight, C., Weiss, S., Barton, K. & Starmer, K. (2002). *Leaf size, specific leaf area and microhabitat distribution of chaparral woody plants: contrasting patterns in species level and community level analyses*. Oecologia, 130, 449–457. <https://doi.org/10.1007/s004420100805>.
- Adewale, S., Akinwale R., Fakorede M. & Badu-Apraku B., (2018). *Genetic analysis of drought-adaptive traits at seedling stage in early-maturing maize inbred lines and field performance under stress conditions*. Euphytica, 214, 145. <https://doi.org/10.1007/s10681-018-2218-z>
- Ali, A.E.E., Husselmann L.H., Tabb D.L. & Ludidi N., (2023). *Comparative proteomics analysis between maize and sorghum uncovers important proteins and metabolic pathways mediating drought tolerance*. Life, 13(1), 170. <https://doi.org/10.3390/life13010170>
- Ali, Q., Ahsan, M., Ali, F., Aslam, M., Khan, N. H., Munzoor, M., Mustafa, H. S. B., & Muhammad, S. (2013). *Heritability, heterosis and heterobeltiosis studies for morphological traits of maize (Zea mays L.) seedlings*. Advancements in Life sciences 1.
- Ali, Q., Ahsan, M., Hussain, B., Elahi, M., Khan, N. H., Ali, F., ... & Naees, M. (2011). *Genetic evaluation of maize (Zea mays L.) accessions under drought stress*. Int. Res. J. Microbiol, 2(11), 437-441.
- Ali, Q., Ahsan, M., Tahir, M. H. N., and Basra, S. M. A. (2012). *Genetic evaluation of maize (Zea mays L.) accessions for growth related seedling traits*. International Journal for Agro Veterinary and Medical Sciences, 6, 164-172.
- Ali, Q., Hammad, M., Tahir, N., Ahsan, M., Basra, S. M. A., Farooq, J., and Elahi, M. (2011). *Correlation and path coefficient studies in maize (Zea mays L.) genotypes under 40% soil moisture contents*. African Journal of Bacteriology Research, 3, 77-82.
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Tanveer, M., Khan, I., Hussain, S., Shahzad, B., ... & Wang, L. C. (2017). *Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids*. Frontiers in plant science, 8, 69. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00069>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Anjum, S. A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., & Nazir, U. (2017). *Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review. Zemdirbyste-Agriculture*, 104(3).
- Anjum, S. A., Tanveer, M., Ashraf, U., Hussain, S., Shahzad, B., Khan, I., & Wang, L. (2016). *Effect of progressive drought stress on growth, leaf gas exchange, and antioxidant production in two maize cultivars. Environmental Science and Pollution Research*, 23, 17132-17141. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6894-8>
- Apel, K., Hirt, H. (2004). *Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. Annu Rev Plant Biol*, 55, 373–399.
- Athar, H.R. and Ashraf, M., (2005). *Photosynthesis under drought stress*. In: Pessarakli, M. (ed.), *Handbook of Photosynthesis*, pp: 793–804. Taylor and Francis, New York.
- Atkin, O. K., and Macherel D., (2009). *The crucial role of plant mitochondria in orchestrating drought tolerance. Ann. Bot.* 103, 581–597.
- Augustine, S.M., (2016). *Function of Heat-shock proteins in drought tolerance regulation of plants*. In: Hossain M, Wani S, Bhattacharjee S, Burritt D, Tran LS (eds) *Drought stress tolerance in plants*, Vol 1. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_7).
- Badr, A, Brüggemann, W. (2020). *Comparative analysis of drought stress response of maize genotypes using chlorophyll fluorescence measurements and leaf relative water content. Photosynthetica* 58(2), 638-645. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.014>.
- Bajji, M., Kinet, J. M., & Lutts, S. (2002). *The use of the electrolyte leakage method for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat. Plant growth regulation*, 36, 61-70.
- Bashir, N., Mahmood, S., Zafar, Z. U., & Rasul, S. (2016). *Is drought tolerance in maize (Zea mays L.) cultivars at the juvenile stage maintained at the reproductive stage. Pak. J. Bot.* 48(4), 1385-1392.
- Bates, L.S., Waldren, R.P., & 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>.
- Benesova, M., Hola, D., Fischer L., Jedelsky, P.L., Hnilic'ka F., et al., (2012). *The Physiology and Proteomics of Drought Tolerance in Maize: Early Stomatal Closure as a Cause of Lower Tolerance to Short-Term Dehydration? PLoS ONE*, 7(6), e38017.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Bhargava, S., Sawant, K. (2012). *Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression*. Plant Breeding, 132, 21–32. <https://doi.org/10.1111/pbr.12004>.
- Blokhina, O., Virolainen, E., & Fagerstedt, K. V. (2003). *Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review*. Annals of botany, 91(2), 179-194.
- Blum, A. 2005: *Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential: are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?* Aust. J. Agric. Res. 56, 1159–1168.
- Blum, A., (2011). Drought resistance – is it really a complex trait? Funct. Plant Biol., 38, 753–757.
- Boomsma, C. R., Santini, J. B., Tollenaar, M., & Vyn, T. J. (2009). *Maize morphophysiological responses to intense crowding and low nitrogen availability: An analysis and review*. Agronomy Journal, 101, 1426-1452.
- Boucher, F.C., Verboom, G.A., Musker, S. & Ellis, A.G., (2017). *Plant size: a key determinant of diversification?* New Phytol, 216, 24. <https://doi.org/10.1111/nph.14697>.
- Bradford, M.M. (1976). *A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding*. Anal Biochem, 72, 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Cakmak, I., Marschner, H. (1992). *Magnesium deficiency and highlight intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and glutathione reductase in bean leaves*. Plant Physiol, 98, 1222-1226. <https://doi.org/10.1104/pp.98.4.1222>.
- Casaretto, J.A., A. El-kereamy., Zeng B., Stieglmeyer S.M., Chen X., Bi Y. & S.J. Rothstein., (2016). *Expression of OsMYB55 In Maize Activates Stress-Responsive Genes and Enhances Heat and Drought Tolerance.*, BMC Genomics, 17- 312.
- Černý, M., Habánová H., Berka M., Luklová M. & Brzobohatý B (2018). *Hydrogen peroxide: its role in plant biology and crosstalk with signalling networks*. Int J Mol Sci, 19(9), 2812. <https://doi.org/10.3390/ijms19092812>
- Chaudhary, H.K., Kaila, V., & Rather, S. A. (2014). *Maize. Alien Gene Transfer in Crop Plants, Volume 2: Achievements and Impacts*, 27-50.
- Chauhan, J., Singh, P., Choyal, P., Mishra, U. N., Saha, D., Kumar, R., ... & Singhal, R. K. (2023). *Plant photosynthesis under abiotic stresses: Damages, adaptive, and signaling mechanisms*. Plant Stress, 100296.
- Chaves, M. M., Flexas J. & Pinheiro C. (2009). *Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell*. Ann. Bot. 103, 551–560.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Cho, E.K., Choi Y.J. (2009). *Anuclear-localized HSP70 confers thermoprotective activity and drought-stress tolerance on plants*. Biotechnol Lett, 31,597–606.
- Choudhury, F.K., Rivero R.M., Blumwald E. & Mittler R (2017). *Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination*. The Plant J, 90(5), 856-867. <https://doi.org/10.1111/tpj.13299>.
- Courgeon, A.M., Rollet, E., Becker, J., Maisonhaute, C. & Best-Belpomme M (1988). *Hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) induces actin and some heat-shock proteins in Drosophila cells*. Eur J Biochem, 171(1–2),163–170.
- DaCosta, M., B. Huang, (2006). *Osmotic adjustment associated with variation in bentgrass tolerance to drought stress*. J. Am. Soc. Hortic. Sci., 131, 338–344.
- Danish, S., Zafar-ul-Hye, M., Mohsin, F. & Hussain, M. (2020). *ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth*. PLoS One, 15(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230615>.
- Dat, J., Vandenabeele, S., Vranova, E., Van Montagu, M., Inze, D. & Van Breusegem F (2000). *Dual action of the active oxygen species during plant stress Responses*. CMLS, Cell Mol Life Sci, 57,779–795.
- de Araújo Silva, M.M., Ferreira, L.T., de Vasconcelos, F.M.T., Willadino, L., Camara, T.R., dos Santos, D.Y.A.C. & de Oliveira A.F.M. (2021). *Water stress-induced responses in the growth, cuticular wax composition, chloroplast pigments and soluble protein content, and redox metabolism of two genotypes of Ricinus communis L.* J Plant Growth Regul, 40, 342-352. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10103-6>.
- Devarajan, A.K., Muthukrishanan, G., Truu, J., Truu, M., Ostonen, I., Kizhaeral S.S., Panneerselvam P. & Kuttalingam Gopalasubramanian, S. (2021). *The foliar application of rice phyllosphere bacteria induces drought-stress tolerance in Oryza sativa (L.)*. Plants, 10, 387. <https://doi.org/10.3390/plants10020387>.
- Doğru, A., Bayram N.E. (2016)., *A Study On Drought Stress Tolerance in Some Maize (Zea mays L.) Cultivars.*, SAÜ Fen Bil Der, 20. Cilt, 3. Sayı, s. 509-519.
- Edreira, J. I. R., and Otegui, M. E. (2012). *Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use*. Field Crops Research, 130, 87-98.
- Efeoğlu, B., Ekmekçi Y., Çiçek N. (2009). *Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery*. South African Journal of Botany, 75, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2008.06.005>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Fait, A., H. Fromm, D., Walter, G., Galili, and Fernie A. (2007). *Highway or byway: the metabolic role of the GABA shunt in plants*. Trends Plant Sci., 13, 14–19.
- Farre, I., and Faci, J. M. (2006). *Comparative response of maize (Zea mays L.) and sorghum (Sorghum bicolor L. Moench) to deficit irrigation in a Mediterranean environment*. Agricultural water management, 83, 135-143.
- Florez-Sarasa, I. D., T. J. Bouma, H. Medrano, J. Azcon-Bieto, & M. Ribas-Carbo, (2007). *Contribution of the cytochrome and alternative pathways to growth respiration and maintenance respiration in Arabidopsis thaliana*. Physiol. Plant, 129, 143–151.
- Garnier, E., Shipley, B., Roumet, C., Laurent, G., (2001). *A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content*. Funct. Ecol., 15, 688–695. <https://doi.org/10.1046/j.0269-8463.2001.00563.x>.
- Gharibi, S., Tabatabaei B.E.S., Saeidi G. & Goli SAH (2016). *Effect of drought stress on total phenolic, lipid peroxidation, and antioxidant activity of Achillea species*. Appl Biochem Biotech, 178, 796-809. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1909-3>
- Gholamin, R., & Khayatnezhad, M. (2020). *Assessment of the correlation between chlorophyll content and drought resistance in corn cultivars (Zea Mays)*. Helix-The Scientific Explorer| Peer Reviewed Bimonthly International Journal, 10(05), 93-97. <https://doi.org/10.29042/2020-10-5-93-97>.
- Gomaa, M. A., Rehab, I. F., Salama, F. A., & Al-Deeb, A. S. M. (2017). *Water-stress in relation to maize (Zea mays L.) grain yield, plant height and proline content*. Alexandria Journal of Agricultural Sciences, 62(3), 311-317.
- Gong, M, Li Y-J, Chen S.Z. (1998). *Absciscic acid induced thermotolerance in maize seedlings is mediated by Ca<sup>2+</sup> and associated with antioxidant systems*. J Plant Physiol, 153,488–496.
- Guizani, A., Askri H., Amenta M.L. (2023). *Drought responsiveness in six wheat genotypes: identification of stress resistance indicators*. Front Plant Sci, 14, 1232583. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1232583>
- Gulen, H., Eris, A. (2003). *Some physiological changes in strawberry (Fragaria × Ananassa cv. ‘Camarosa’) plants under heat stress*. J Hort Sci Biotech, 78, 894-898. <https://doi.org/10.1080/14620316.2003.11511715>.
- Guo, Y., Huang, G., Guo, Q., Peng, C., Liu, Y., Zhang, M., ... & Duan, L. (2023). *Increase in root density induced by coronatine improves maize drought resistance in North China*. The Crop Journal, 11(1), 278-290.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Hajibabae, M., Azizi, F., & Zargari, K. (2012). *Effect of drought stress on some morphological, physiological and agronomic traits in various foliage corn hybrids*. Am Eurasian J Agric Environ Sci, 12(7), 890-896.
- Hasanuzzaman, M, Bhuyan MB, Zulfiqar F et al (2020). *Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator*. Antioxidants, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Gill, S. S., & Fujita, M. (2013). *Drought stress responses in plants, oxidative stress, and antioxidant defense*. Climate change and plant abiotic stress tolerance, 209-250.
- Haseeb, A., Nawaz, A., Rao, M. Q. A., Ali, Q., & Malik, A. (2020). *Genetic variability and association among seedling traits of Zea mays under drought stress conditions*. Biological and Clinical Sciences Research Journal, 2020(1).
- Hayano-Kanashiro, C., Caldero'n-Va'zquez C., Ibarra-Laclette E., Herrera-Estrella L., Simpson J., (2009). *Analysis of Gene Expression and Physiological Responses in Three Mexican Maize Landraces under Drought Stress and Recovery Irrigation*. PLoS ONE, 4(10), e7531.
- Hodges, D.M., DeLong, J.M., Forney, C.F. & Prange, R.K., (1999). *Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds*. Planta, 207, 604-611. <https://doi.org/10.1007/s004250050524>.
- Hsaio, T. C., and L. K. Xu, (2000). *Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport*. J. Exp. Bot., 51, 1596–1616.
- Hu, X, Liu R, Li Y, Wang W, Tai F, Xue R, Li C (2010). *Heat shock protein 70 regulates the abscisic acid-induced antioxidant response of maize to combined drought and heat stress*. Plant Growth Regul, 60, 225–235. <https://doi.org/10.1007/s10725-009-9436-2>.
- Hu, X., Liu, R., Li, Y., Wang, W., Tai, F., Xue, R., & Li, C. (2010). *Heat shock protein 70 regulates the abscisic acid-induced antioxidant response of maize to combined drought and heat stress*. Plant Growth Regulation, 60, 225-235. <https://doi.org/10.1007/s10725-009-9436-2>.
- Hulshof, C.M., Violle, C., Spasojevic, M.J., McGill, B., Damschen, E., Harrison, S., Enquist, B.J., (2013). *Intra-specific and inter-specific variation in specific leaf area reveal the importance of abiotic and biotic drivers of species diversity across elevation and latitude*. J. Veg. Sci., 24, 921–931. <https://doi.org/10.1111/jvs.12041>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Jain, M., Kataria, S., Hirve, M. & Prajapati R. (2019). *Water deficit stress effects and responses in maize*. In: Hasanuzzaman M, Hakeem K, Nahar K, Alharby H (eds) *Plant abiotic stress tolerance*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_5)
- Kalaji, H. M., A. Jajoo, A. Oukarroum, M. Brestic, M. Zivcak, I. A. Samborska, M. D. Cetner, I., Łukasik, V. Goltsev & R. J. Ladle (2016). "Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions." *Acta physiologiae plantarum* 38(4), 104.
- Kamphorst, SH, Amaral Júnior ATD, Lima VJD et al (2019). *Can genetic progress for drought tolerance in popcorn be achieved by indirect selection?* *Agronomy*, 9(12), 792. <https://doi.org/10.3390/agronomy9120792>
- Kaur, S., Kumar, P. (2020). *Morpho-physiological and biochemical response of plants under drought stress*. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(4), 352-357.
- Khan, Z. & Shahwar, D. (2020). *Role of heat shock proteins (HSPs) and heat stress tolerance in crop plants*. In: Roychowdhury R, Choudhury S, Hasanuzzaman M, Srivastava S (eds) *Sustainable agriculture in the era of climate change*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45669-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45669-6_9).
- Khayatnezhad, M. & R. Gholamin (2012). "The effect of drought stress on leaf chlorophyll content and stress resistance in maize cultivars (*Zea mays*)." *African Journal of Microbiology Research*, 6(12), 2844-2848.
- Kim, K. H., & Lee, B. M. (2023). *Effects of Climate Change and Drought Tolerance on Maize Growth*. *Plants*, 12(20), 3548.
- Kosar, F., Akram, N.A., Ashraf, M., Ahmad, A., Alyemeni, M.N. & Ahmad, P. (2020). *Impact of exogenously applied trehalose on leaf biochemistry, achene yield and oil composition of sunflower under drought stress*. *Physiol Plant*, 13155. <https://doi.org/10.1111/ppl.13155>
- Kozeko, L. (2021). *Different roles of inducible and constitutive HSP70 and HSP90 in tolerance of Arabidopsis thaliana to high temperature and water deficit*. *Acta Physiologiae Plantarum*, 43(4), 58. <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03229-x>
- Lambers, H, Oliveira, R.S. (2019). *Plant water relations*. In: *Plant Physiological Ecology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1_5)
- Lambers, H., S. A. Robinson, and M. Ribas-Carbo, (2005). *Regulation of respiration in vivo*. In: H. Lambers, and M. Ribas-Carbo (eds), *Plant Respiration: From Cell to Ecosystem*. *Advances in Photosynthesis and Respiration Series*, 18, 1–15. Springer, The Netherlands.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Larkindale, J., Knight, M.R. (2002). *Protection against heat stress induced oxidative damage in arabidopsis involves calcium, abscisic acid, ethylene, and salicylic acid*. Plant Physiol, 128, 682–695.
- Lawlor, D. W., and G. Cornic, (2002). *Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants*. Plant Cell Environ, 25, 275–294.
- Lawlor, D. W., and W. Tezara. (2009). *Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes*. Ann. Bot, 103, 561–579.
- Li, H, Yang, M., Zhao, C., Wang, Y. & Zhang, R. (2021a). *Physiological and proteomic analyses revealed the response mechanisms of two different drought-resistant maize varieties*. BMC Plant Biol, 21, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03295-w>.
- Li, H.J., Wang, Y.F., Zhao, C.F. et al (2021b). *The quantitative proteomic analysis provides insight into the effects of drought stress in maize*. Photosynthetica, 59(1), 1-11. <https://doi.org/10.32615/ps.2020.078>.
- Li, Z, Howell, S.H. (2021). *Heat stress responses and thermotolerance in maize*. International J Mol Sci, 22(2), 948. <https://doi.org/10.3390/ijms22020948>.
- Liu, S., Zenda, T., Dong, A., Yang, Y., Wang, N. & Duan, H. (2021). *Global transcriptome and weighted gene co-expression network analyses of growth-stage-specific drought stress responses in maize*. Front Genet, 12, 645443. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.645443>.
- Liu, J., Y, Guo., Y, Bai., J, Camberatoç, J. Xue & R., Zhang. (2018). *"Effects of drought stress on the photosynthesis in maize."* Russian journal of plant physiology, 65(6), 849-856.
- Livak, K.J., Schmittgen, T.D., (2001). *Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the  $2^{-\Delta\Delta CT}$  method*. Methods, 25, 402–8. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.645443>.
- Luqman, M., Shahbaz, M., Maqsood, M. F., Farhat, F., Zulfiqar, U., Siddiqui, M. H., ... & Haider, F. U. (2023). *Effect of strigolactone on growth, photosynthetic efficiency, antioxidant activity, and osmolytes accumulation in different maize (Zea mays L.) hybrids grown under drought stress*. Plant Signaling & Behavior, 18(1), 2262795.
- Mansour, M.M.F., Salama, K.H.A. (2020). *Proline and abiotic stresses: responses and adaptation*. In: Hasanuzzaman M (ed) *Plant ecophysiology and adaptation under climate change: mechanisms and perspectives II*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2172-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2172-0_12).

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Masood, S. A., Jabeen, S., Anum, M., Naseem, Z., Jamshaid, A., & Ali, Q. (2015). *Genetic Association of transcriptional factors (OsAP2 gene family) to incorporate drought tolerance in rice*. Life Science Journal 12, 71-76.
- Mittler., R. (2002). *Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance*. Trends Plant Sci, 7, 405–410.
- Molla, M.S.H., Kumdee, O., Worathongchai, N., Khongchuu, P., Ali, M.A., Anwar, M.M., ... & Nakasathien, S. (2023). *Efforts to Stimulate Morpho-Physio-Biochemical Traits of Maize for Efficient Production under Drought Stress in Tropics Field*. Agronomy, 13(11), 2673.
- Mousavi, A.K., Dadashi M.R., Kalat S.M.N. & Khorasani, S.K. (2023). *The effect of planting date and irrigation regimes on yield and chlorophyll content, osmolytes and antioxidant enzymes in sweet corn (Zea mays L. var saccharata)*. Rom Agric Res, 40, 95-104. <https://doi.org/10.59665/rar4009>.
- Mukarram, M., Choudhary S., Kurjak D., Petek A. & Khan, M.M.A. (2021). *Drought: Sensing, signalling, effects and tolerance in higher plants*. Physiol Plant, 172, 1291–1300. <https://doi.org/10.1111/ppl.13423>.
- Mupangwa, W., Twomlow, S., Walker, S., & Hove, L. (2007). *Effect of minimum tillage and mulching on maize (Zea mays L.) yield and water content of clayey and sandy soils*. Physics and chemistry of the earth, parts A/B/C 32, 1127-1134.
- Oono, Y, Seki M, Nanjo T, Narusaka M, Fujita M, Satoh R, Satou M, Sakurai T, Ishida J, Akiyama K, Iida K, Maruyama K, Satoh S, Yamaguchi-Shinozaki K, Shinozaki K (2003). *Monitoring expression profiles of Arabidopsis gene expression during rehydration process after dehydration using ca. 7000 full-length cDNA microarray*. Plant J, 34, 868–887.
- Ozturk, M., Turkyilmaz Unal, B., García-Caparrós, P., Khursheed, A., Gul, A., & Hasanuzzaman, M. (2021). *Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants*. Physiologia plantarum, 172(2), 1321-1335. <https://doi.org/10.1111/ppl.13297>.
- Pandita, D., Parthasarathy, S., Dhivyapriya, D., Premkumar, R., Pandita, A. & Wani, S.H. (2023). *Genome diversity in maize*. In: Wani SH, Dar ZA, Singh GP (eds) *Maize improvement: Current advances in yield, quality, and stress tolerance under changing climatic scenarios (pp. 1-24)*. Cham: Springer International Publishing.
- Parent, B., C. Hachez., E. Redondo., T. Simonneau., F. Chaumont., & F. Tardieu., (2009). *Drought and abscisic acid effects on aquaporin content translate into changes in hydraulic conductivity and leaf growth rate: a trans-scale approach*. Plant Physiol, 149, 2000–2012.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Peiffer, J. A., Roday, M. C., Gore, M. A., Flint-Garcia, S. A., Zhang, Z., Millard, M. J. & Buckler, E.S. (2014). *The genetic architecture of maize height*. Genetics, 196(4), 1337-1356.
- Peleg, Z., E. Blumwald. (2011). *Hormone balance and abiotic stress tolerance in crop plants*. Curr. Opin. Plant Biol, 14, 290–295.
- Plaxton, W., and F. Podesta, (2006). *The functional organization and control of plant respiration*. Crit. Rev. Plant Sci, 25, 159–198.
- Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I.J. & Villar, R. (2009). *Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis*. New Phytol, 182, 565–588. <https://doi.org/10.2307/30224782>.
- Pospisilova, J., H. Synkova, & J. Rulcova, (2000). *Cytokinins and water stress*. Biol. Plant, 43, 321–328.
- Pradawet, C., Khongdee, N., Pansak, W., Spreer, W., Hilger, T., & Cadisch, G. (2023). *Thermal imaging for assessment of maize water stress and yield prediction under drought conditions*. Journal of Agronomy and Crop Science, 209(1), 56-70.
- Priya, M., Dhanker O.P., Siddique K.H. et al. (2019). *Drought and heat stress-related proteins: an update about their functional relevance in imparting stress tolerance in agricultural crops*. Theor Appl Genet, 132, 1607-1638. <https://doi.org/10.1007/s00122-019-03331-2>.
- Pulido, P., Llamas E. & Rodriguez-Concepcion M. (2017). *Both Hsp70 chaperone and Clp protease plastidial systems are required for protection against oxidative stress*. Plant Signal Behav, 12, e1290039. <https://doi.org/10.1080/15592324.2017.1290039>.
- Raghavendra, A.S., and K. Padmasree, (2003). *Beneficial interactions of mitochondrial metabolism with photosynthetic carbon assimilation*. Trends Plant Sci, 8, 546–553.
- Rahneshan, Z., F. Nasibi & A. A. Moghadam (2018). *"Effects of salinity stress on some growth, physiological, biochemical parameters and nutrients in two pistachio (Pistacia vera L.) rootstocks"*. Journal of Plant Interactions, 13(1), 73-82.
- Rajput, V.D., Harish, Singh R.K. et al. (2021). *Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress*. Biology, 10(4), 267. <https://doi.org/10.3390/biology10040267>.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J.P., & Garcia-Casal, M.N. (2014). *Global maize production, utilization, and consumption*. Annals of the New York academy of sciences, 1312(1), 105-112.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Rao, A.R., Baskaran, V., Sarada, R., Ravishankar, G.A. (2013). In vivo bioavailability and antioxidant activity of carotenoids from microalgal biomass—a repeated dose study. *Food Res Int* 54(1), 711–717.
- Rasheed, A., Jie, H., Ali, B. et al. (2023). *Breeding drought-tolerant maize (Zea mays) using molecular breeding tools: Recent advancements and future prospective*. *Agronomy* 13(6), 1459. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061459>.
- Rawat, N., Singla-Pareek, S. L., & Pareek, A. (2021). *Membrane dynamics during individual and combined abiotic stresses in plants and tools to study the same*. *Physiologia Plantarum*, 171(4), 653-676.
- Raza, A., Mubarik, M. S., Sharif, R., Habib, M., Jabeen, W., Zhang, C., ... & Varshney, R. K. (2023). *Developing drought-smart, ready-to-grow future crops*. *The Plant Genome*, 16(1), e20279.
- Ren, W., Shi, Z., Zhou, M., Zhao, B., Li, H., Wang, J., Liu, Y. & Zhao, J. (2022). *iTRAQ-based quantitative proteomic analysis provides insight into the drought-stress response in maize seedlings*. *Sci Rep*, 12(1), 9520. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13110-7>.
- Rizhsky, L., Hongjian, L. & Mittler, R. (2002). *The combined effect of drought stress and heat shock on gene expression in tobacco*. *Plant Physiol*, 130, 1143–1151.
- Rohman, M.M., Islam, M.R., Mahmuda, B.M., Begum, S., Fakir, O.A. & Amiruzzaman, M. (2018). *Higher K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> and lower reactive oxygen species and lipid peroxidation are related to higher yield in maize under saline condition*. *Afr J Agric Res*, 13(5), 239–247. <https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12878>.
- Roitsch, T., 1999: *Source-sink regulation by sugar and stress*. *Curr. Opin. Plant Biol*, 2, 198–206.
- Rouhier, N., C. Vieira Dos Santos, L. Tarrago, and P. Rey, (2006). *Plant methionine sulfoxide reductase A and B multigenic families*. *Photosynth. Res*, 89, 247–262.
- Ru, C., Wang, K., Hu, X. et al (2023). *Nitrogen modulates the effects of heat, drought, and combined stresses on photosynthesis, antioxidant capacity, cell osmoregulation, and grain yield in winter wheat*. *J Plant Growth Regul*, 42, 1681–1703. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10650-0>.
- Rudolphi-Szydło, E., Dyba, B., Janeczko, A., Latowski, D., Sadura, I. & Filek, M. (2022). *Brassinosteroid-lipid membrane interaction under low and high temperature stress in model systems*. *BMC Plant Biol*, 22(1), 246. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03619-4>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sade, N., G. Alem, and M. Moshelion, (2012). *Risk-taking plants. Anisohydric behavior as a stress-resistance trait*. Plant Signal. Behav, 7, 1–4.
- Sah, R. P., Chakraborty, M., Prasad, K., Pandit, M., Tudu, V. K., Chakravarty, M. K., ... & Moharana, D. (2020). *Impact of water deficit stress in maize: phenology and yield components*. Sci Rep, 10, 2944. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59689-7>.
- Sairam, R.K., Shukla, D.S. & Saxena, D.C. (1997). *Stress induced injury and antioxidant enzymes in relation to drought tolerance in wheat genotypes*. Biol Plant, 40, 357-364. <https://doi.org/10.1023/A:1001009812864>.
- Sairam, S. K. (1994). *Effects of homobrassinolide application on plant metabolism and grain yield under irrigated and moisture-stress conditions of two wheat varieties*. Plant Growth Regul, 14, 173–181.
- Sanders, G.J., Arndt S.K. (2012). *Osmotic adjustment under drought conditions*. In: Aroca R (ed) *Plant responses to drought stress*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_8).
- Sapes, G., Sala A. (2021). *Relative water content consistently predicts drought mortality risk in seedling populations with different morphology, physiology and times to death*. Plant, Cell Environ 44(10), 3322-3335. <https://doi.org/10.1111/pce.14149>.
- Sari-Gorla, M., Krajewski, P., Di Fonzo, N., Villa, M., & Frova, C. (1999). *Genetic analysis of drought tolerance in maize by molecular markers. II. Plant height and flowering*. Theoretical and Applied Genetics, 99, 289-295.
- Schmitt, K.F.M., do Amaral Junior, A.T. & Kamphorst SH (2024). *Decoding the effects of drought stress on popcorn (Zea mays var. everta) flowering combining proteomics and physiological analysis*. Plant Physiol Biochem, 208, 108444. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108444>.
- Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N. et al (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, S., Shah, Z., Khalail, S.K., Amanullah, J., Jan, M.T., Afzal, M., Akbar, H., Khan, H., Nawab, K. & Muhammad, F. (2014). *Effects of variable nitrogen source and rate on leaf area index and total dry matter accumulation in maize (Zea mays L.) genotypes under calcareous soils*. Turk J Field Crops, 19, 276–284. <https://doi.org/10.17557/tjfc.90307>
- Shahzad, A., Gul, H., Ahsan, M., Wang, D., & Fahad, S. (2023). *Comparative genetic evaluation of maize inbred lines at seedling and maturity stages under drought stress*. Journal of Plant Growth Regulation, 42(2), 989-1005.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Shakeri, E., Mozafari A.A., Sohrabi, F., Saed-Moucheshi, A. (2019). *Role of proline and other osmoregulatory compounds in plant responses to abiotic stresses*. In: Pessarakli M (ed) *Handbook of plant and crop stress*, fourth edition (pp. 165-173). CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781351104609>
- Shao, H. B., L. Y. Chu, Z. H. Lu, and C. M. Kang, (2008). *Primary antioxidant free radical scavenging and redox signaling pathways in higher plant cells*. Int. J. Biol. Sci, 4, 8–14.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., and Pessarakli, M. (2012). *Reactive oxygen species, oxidative damage and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions*. J. Bot, 2012, 217037. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>.
- Siedow, J. N., and A. L. Umbach, (2000). *The mitochondrial cyanideresistant oxidase: structural conservation amid regulatory diversity*. Biochim. Biophys. Acta 1459, 432–439.
- Singh, G.M., Goldberg, S., Schaefer D., Zhang, F., Sharma, S., Mishra, V.K. & Xu, J. (2022). *Biochemical, gas exchange, and chlorophyll fluorescence analysis of maize genotypes under drought stress reveals important insights into their interaction and homeostasis*. Photosynthetica, 60(3), 376-388. <https://doi.org/10.32615/ps.2022.024>
- Singh, P.K., Srivastava, D., Tiwari, P., Tiwari, M., Verma, G. & Chakrabarty D (2019a). *Drought tolerance in plants: molecular mechanism and regulation of signaling molecules*. In: Khan MIR, Reddy PS, Ferrante A, Khan NA (eds) *Plant signaling molecules* (pp. 105-123). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816451-8.00006-X>.
- Singh, R.K., Gupta, V. & Prasad, M. (2019b). *Plant molecular chaperones: structural organization and their roles in abiotic stress tolerance*. Mol Plant Abiotic Stress: Biol Biotechnol, 12, 221–39. <https://doi.org/10.1002/9781119463665.ch12>.
- Song, L., Jin, J., & He, J. (2019). *Effects of severe water stress on maize growth processes in the field*. Sustainability, 11(18), 5086.
- Song, X., Zhou, G., & He, Q. (2021). *Critical leaf water content for maize photosynthesis under drought stress and its response to rewatering*. Sustainability, 13(13), 7218. <https://doi.org/10.3390/su13137218>.
- Thomas, S.C., (2010). *Photosynthetic capacity peaks at intermediate size in temperate deciduous trees*. Tree Physiol, 30, 555. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq005>.
- Ul Haq, S., Khan, A., Ali, M., Khattak, A.M., Gai, W.X., Zhang, H.X., Wei, A.M. & Gong, Z.H. (2019). *Heat shock proteins: dynamic biomolecules to counter plant biotic and abiotic stresses*. Int J Mol Sci, 20, 5321. <https://doi.org/10.3390/ijms20215321>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Urban, A., Rogowski, P., Wasilewska-Dębowska, W., & Romanowska, E. (2021). *Understanding maize response to nitrogen limitation in different light conditions for the improvement of photosynthesis*. *Plants*, 10(9), 1932.
- Valentovic, P.S.A.V., Luxova, M.S.A.V., Kolarovic, L.S.A.V. & Gasparikova, O.S.A.V. (2006). *Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and water relations in two maize cultivars*. *Plant Soil and Environment*, 52(4), 184.
- Valentovic, P., Luxova, M., Kolarovic, L., & Gasparikova, O. (2006). *Effect of osmotic stress on compatible solutes content, membrane stability and water relations in two maize cultivars*. *Plant Soil and Environment*, 52(4), 184.
- Van Aken, O., J. Whelan, and F. Van Breusegem, (2010). *Prohibitins: mitochondrial partners in development and stress response*. *Trends Plant Sci*, 15, 275–282.
- Velikova, V., Yordanov, I. & Edreva, A., (2000). *Oxidative stress and some antioxidant system in acid rain-treated bean plants protective role of exogenous polyamines*. *Plant Sci*, 151, 59-66. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(99\)00197-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(99)00197-1).
- Wang, P., Liu, W.C., Han, C., Wang, S., Bai, M.Y. & Song, C.P. (2024). *Reactive oxygen species: multidimensional regulators of plant adaptation to abiotic stress and development*. *J Integ Plant Biol*, 66(3), 330-367. <https://doi.org/10.1111/jipb.13601>.
- Wang, C., A. Yang, H. Yin, and J. Zhang, (2008). *Influence of water stress on endogenous hormone contents and cell damage of maize seedlings*. *J. Integr. Plant Biol*, 50, 427–434.
- Wang, W., Vinocur, B., Shoseyov, O. & Altman, A., (2004). *Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response*. *Trends Plant Sci*, 9(5), 244–52. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.03.006>.
- Werner, T., E. Nehnevajova, I. Keollmera, O. Novak, M. Strnad, U. Kremer, and T. Schmeulliga, (2010). *Root-specific reduction of cytokinin causes enhanced root growth, drought tolerance, and leaf mineral enrichment in Arabidopsis and Tobacco*. *Plant Cell*, 22, 3905–3920.
- White, J.D., Scott, N.A., (2006). *Specific leaf area and nitrogen distribution in New Zealand forests: species independently respond to intercepted light*. *For. Ecol. Manage.* 226, 319–329. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.001>.
- Wilkinson, S., and W. J. Davies, (2010). *Drought, ozone, ABA and ethylene: new insights from cell to plant to community*. *Plant, Cell Environ*, 33, 510–525.
- Wilson, P.J., Thompson, K., Hodgson, J.G. (1999). *Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies*. *New Phytol*, 143, 155–162. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00427.x>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Xie, Z.J., D. Jiang, W. X. Cao, T. B. Dai, and Q. Jing, (2003). *Relationships of endogenous plant hormones to accumulation of grain protein and starch in winter wheat under different post-anthesis soil water statuses*. Plant Growth Regul, 41, 117–127.
- Xiong, L., K. S. Schumaker, and J. K. Zhu, (2002). *Cell signaling during cold, drought, and salt stress*. Plant Cell, 14, S165–S183.
- Yan, LJ, Christians ES, Liu L, Xiao X, Sohal RS, Benjamin IJ (2002). *Mouse heat shock transcription factor 1 deficiency alters cardiac redox homeostasis and increases mitochondrial oxidative damage*. EMBO J, 21, 5164–5172.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z. & Chen, S. (2021). *Response mechanism of plants to drought stress*. Horticulturae, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>.
- Yin, L., Xu, J., Zhang, L., Liu, D., Zhang, C., Liu, T., ... & Deng, X. (2024). *Altered fatty acid composition confers improved drought acclimation in maize*. Plant Physiology and Biochemistry, 206, 108274. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108274>.
- Yousaf, M.I., Riaz, M.W., Shehzad, A., Jamil, S., Shahzad, R., Kanwal, S., ... & Hussain, Q. (2023). *Responses of maize hybrids to water stress conditions at different developmental stages: accumulation of reactive oxygen species, activity of enzymatic antioxidants and degradation in kernel quality traits*. PeerJ, 11, e14983.
- Zhang, C., Wang, F., Jiao, P. et al (2024). *The overexpression of Zea mays strigolactone receptor gene D14 enhances drought resistance in Arabidopsis thaliana L*. Inter J Mol Sci, 25(2), 1327. <https://doi.org/10.3390/ijms25021327>.
- Zhang, H.Y., Lu, N.H., Xie, Y., Guo, G.H., Zhan, J.H., & Chen, J. (2008). *Influence of heat shock preconditioning on structure and function of mitochondria in gastric mucosa of severely burned animals: experiment with rats*. Zhonghua Yi Xue Za Zhi, 88(8), 564–567.
- Zhang, L.X., Lai, J.H., Liang, Z.S. & Ashraf, M. (2014). *Interactive effects of sudden and gradual drought stress and foliar-applied glycinebetaine on growth, water relations, osmolytes accumulation and antioxidant defence system in two maize cultivars differing in drought tolerance*. J Agron Crop Sci, 200, 425–433.
- Zhang, P., Yuan, Z., Wei, L., Qiu, X., Wang, G., Liu, Z., ... & Wang, T., (2022). *Overexpression of ZmPP2C55 Positively Enhances Tolerance to Drought Stress in Transgenic Maize Plants*. Plant Science, 314, 111127.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Zhang, S.W., C. H. Li, J. Cao, Y. C. Zhang, S. Q. Zhang, Y. F. Xia, D. Y. Sun, and Y. Sun, (2009). *Altered architecture and enhanced drought tolerance in rice via the down-regulation of indole-3-Acetic Acid by TLD1/OsGH3.13 activation*. Plant Physiol, 151, 1889–1901.
- Zhao, F., Zhang D., Zhao Y., Wang W., Yang H., Tai F., Li C. and Hu X., (2016). *The Difference of Physiological and Proteomic Changes in Maize Leaves Adaptation to Drought, Heat, and Combined Both Stresses.*, Front. Plant Sci, 7, 1471.
- Zhou, H., Zhou, G., He, Q., Zhou, L., Ji, Y., & Zhou, M. (2020). *Environmental explanation of maize specific leaf area under varying water stress regimes*. Environmental and Experimental Botany, 171, 103932.