



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TUZ STRESİ KOŞULLARINDA BOR
UYGULAMALARININ MISIR BİTKİSİNİN
GELİŞİMİ VE TOLERANS MEKANİZMASI
ÜZERİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Zuhal Zeynep AVŞAROĞLU

DOKTORA TEZİ

Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı

Ağustos-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Zuhal Zeynep Avşaroğlu tarafından hazırlanan “**Tuz Stresi Koşullarında Bor Uygulamalarının Mısır Bitkisinin Gelişimi ve Tolerans Mekanizması Üzerine Etkisinin Belirlenmesi**” adlı tez çalışması 23/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Sait GEZGİN

.....

Danışman

Prof. Dr. Mehmet HAMURCU

.....

Üye

Prof. Dr. Ceyda ÖZFİDAN KONAKÇI

.....

Üye

Prof. Dr. Aydın GÜNEŞ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Fatma GÖKMEN YILMAZ

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL
FBE Müdürü

Tez çalışmam BAP tarafından 19201069 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Zuhal Zeynep AVŞAROĞLU

Tarih: 23.08.2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TUZ STRESİ KOŞULLARINDA BOR UYGULAMALARININ MISIR BİTKİSİNİN GELİŞİMİ VE TOLERANS MEKANİZMASI ÜZERİNE ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Zuhal Zeynep AVŞAROĞLU

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet HAMURCU

2024, 134 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet HAMURCU

Prof. Dr. Sait GEZGİN

Prof. Dr. Ceyda ÖZFİDAN KONAKÇI

Prof. Dr. Aydın GÜNEŞ

Dr. Öğr. Üyesi Fatma GÖKMEN YILMAZ

Tuz stresi, bitki büyümesini ve gelişimini etkileyen önemli abiyotik stres faktörleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, tuz stresi (150 mM NaCl) koşullarında bor uygulamalarının (0 mM B, 0.50 mM B ve 4 mM B) bazı mısır genotiplerinde (MAE 103 ve MAE 45) meydana getirdiği morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve anatomik değişimlerin tolerans mekanizması üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bazı mısır genotiplerinin tuz ve bor toksisitesi stresine tepkilerinin belirlenmesi için yapılan genel tarama aşamasında, 120 adet farklı mısır genotipinin büyüme parametreleri ve fizyolojik değişimler bakımından değerlendirilmiştir. Taramalar sonucunda B toksitesine toleranslı ve tuza dayanıklı olduğu belirlenen MAE 103) ve B toksitesine toleranssız ve tuza dayanıksız olduğu belirlenen MAE 45 mısır genotipleri ile ana deneme kurulmuştur. Çalışmamızda mısır genotiplerinin temel büyüme parametreleri (kök boyu, gövde boyu, yaş ve kuru ağırlıkları), gövde Ca, Mg, K, Na, Cl ve B içerikleri, bağlı su içerikleri (RWC), prolin, elektrolit sızıntısı (EC), malondialdehit (MDA) miktarları, süperoksit dismutaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX), katalaz (CAT), peroksidaz (POX), glutatyon redüktaz (GR) antioksidan enzimler, Glutatyon (GSH) ve okside glutatyon (GSSG) içerikleri belirlenmiştir. Bitkilerde hidrojen peroksit (H_2O_2) ve hidroksil radikali ($\bullet OH$) gibi reaktif oksijen türlerinin yanında yaprakların anatomik yapılarındaki değişimler incelenmiştir.

Tuz stresi koşullarında yetersiz B uygulamasında MAE 103 (tuza dayanıklı) mısır genotipi diğer B uygulamalarına göre SOD, EC, MDA ve H_2O_2 içerikleri artarken, CAT, GR, GSH, Na, Cl ve B içeriklerinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. MAE 45 (tuza dayanıksız) mısır genotipinin GSSG ve Cl içerikleri artarken, POX, APX, Ca ve Mg içeriklerinde azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca bitkinin üst epidermis hücrelerinin büyümelerine ve alt epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerini daha da kalınlaştırarak anatomik yapısını değiştirdiği belirlenmiştir.

Tuz stresi koşullarında toksik B uygulamasında MAE 103 (tuza dayanıklı) mısır genotipinde diğer B uygulamalarına göre CAT, B ve Mg içerikleri artarken, GSSG, MDA, OH radikali ve K içeriğinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Tuz stresi koşullarında toksik B uygulaması MAE 45 (tuza dayanıksız) mısır genotipinin POX, GSH, $\bullet OH$ ve Na içerikleri artarken, SOD ve K içeriklerinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında bitkinin üst epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerini kalınlaştırarak ve mezofil dokularını genişleterek anatomik yapılarında değişimler olduğu tespit edilmiştir.

Tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamasında MAE 103 (tuza dayanıklı) mısır genotipinde APX, GR, Ca ve Mg içerikleri artarken, MDA, $\bullet OH$, Na ve Cl içeriklerinde azalmalar olduğu

belirlenmiştir. MAE 45 (tuza dayanıksız) mısır genotipinde POX, CAT, GR, GSH, Ca, Na ve Cl içerikleri artarken, SOD, EC, $\bullet\text{OH}$, H_2O_2 , Mg ve K içeriklerinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte bitkinin alt epidermisindeki sklerankima hücrelerini ve üst epidermis hücrelerindeki kutikula enlerini kalınlaştırarak anatomik yapısında değişimler göstermiştir.

Mısır genotiplerinde yeterli B uygulaması antioksidan enzimlerin aktivitesini artırarak oksidatif hasarlanmalarda bitki hücrelerinin yapılarını koruyarak tuz stresine tolerans sağlamada iyileştirici yönde etki yaptığı tespit edilmiştir. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda yeterli B MAE 103 mısır genotipinin antioksidan enzim aktivitelerinde daha fazla artış gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: antioksidan enzimler, bor stresi, tuz stresi, *Zea mays*

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE EFFECT OF BORON APPLICATIONS ON THE DEVELOPMENT AND TOLERANCE MECHANISM OF MAIZE UNDER SALT STRESS CONDITIONS

Zuhal Zeynep AVŞAROĞLU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF
SOIL SCIENCE AND PLANT NUTRITION**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet HAMURCU

2024, 220 Sayfa

Jury

Prof. Dr. Mehmet HAMURCU

Prof. Dr. Sait GEZGİN

Prof. Dr. Ceyda ÖZFİDAN KONAĞCI

Prof. Dr. Aydın GÜNEŞ

Dr. Öğr. Üyesi Fatma GÖKMEN YILMAZ

Salt stress is one of the important abiotic stress factors affecting plant growth and development. In this study, it was aimed to determine the effects of boron applications (0 mM B, 0.50 mM B and 4 mM B) on the tolerance mechanism of morphological, physiological, biochemical and anatomical changes induced in some maize genotypes (MAE 103 and MAE 45) under salt stress (150 mM NaCl) conditions. In the general screening phase to determine the responses of some maize genotypes to salt and boron toxicity stress, 120 different maize genotypes were evaluated in terms of growth parameters and physiological changes. The main experiment was established with maize genotypes MAE 103, which was determined to be tolerant to B toxicity and salt tolerant, and MAE 45, which was determined to be intolerant to B toxicity and salt tolerant. In our study, basic growth parameters of maize genotypes (root length, stem length, wet and dry weights), stem Ca, Mg, K, Na, Cl and B contents, relative water contents (RWC), proline, electrolyte leakage (EC), Malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX), catalase (CAT), peroxidase (POX), glutathione reductase (GR) antioxidant enzymes, glutathione (GSH) and oxidised glutathione (GSSG) contents were determined. Reactive oxygen species such as hydrogen peroxide (H₂O₂) and hydroxyl radical (-OH-) and changes in the anatomical structure of leaves were analysed.

In insufficient B application under salt stress conditions, SOD, EC, MDA and H₂O₂ contents of MAE 103 (salt resistant) maize genotype increased while CAT, GR, GSH, Na, Cl and B contents decreased compared to other B applications. While GSSG and Cl contents of MAE 45 (salt tolerant) maize genotype increased, POX, APX, Ca and Mg contents decreased. In addition, it was determined that the growth of the upper epidermis cells of the plant and the anatomical structure of the plant changed by thickening the width of the cuticle covering the lower epidermis cells.

In toxic B application under salt stress conditions, CAT, B and Mg contents of MAE 103 (salt resistant) maize genotype increased while GSSG, MDA, OH radical and K contents decreased compared to other B applications. While POX, GSH, -OH- and Na contents of MAE 45 (salt intolerant) maize genotype increased, SOD and K contents decreased in toxic B application under salt stress conditions. In addition, it was determined that there were changes in the anatomical structures of the plant by thickening the cuticle widths covering the upper epidermis cells and expanding the mesophyll tissues.

It was determined that APX, GR, Ca and Mg contents of MAE 103 (salt tolerant) maize genotype increased, while MDA, -OH-, Na and Cl contents decreased in sufficient B application under salt stress conditions. In MAE 45 (non-salt tolerant) maize genotype, POX, CAT, GR, GSH, Ca, Na and Cl contents increased, while SOD, EC, -OH-, H₂O₂, Mg and K contents decreased. In addition, sclerenchyma cells in the lower epidermis and cuticle widths in the upper epidermis cells were thickened and anatomical structure of the plant was changed. Adequate B application in maize genotypes was found to improve the tolerance to salt stress by protecting the structures of plant cells in oxidative damage by increasing the activity of antioxidant enzymes. MAE 103 genotype was able to provide more protection against oxidative damage by providing more increase in antioxidant enzyme activities.

Keywords: antioxidant enzymes, boron stress, salt stress, maize



ÖNSÖZ

Tez çalışma sürecinde desteklerini benden esirgemeyen, bilgisiyle ve tecrübesiyle bana doğru yolu gösteren değerli danışmanım Sayın hocam Prof. Dr. Mehmet HAMURCU' ya sonsuz teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince sağladıkları bilimsel katkılarından dolayı Tez İzleme Komitesi üyeleri hocalarımla Prof. Dr. Sait GEZGİN'e ve Prof. Dr. Ceyda ÖZFİDAN KONAKÇI hocama en içten teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarındaki özverili yardımlarından dolayı Canan ÜSTÜN'e ve A. Hümeysra Omay'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni maddi ve manevi yönden destekleyen, sevgilerini esirgemeyen her durumda her zorlukta yanımda olan, bana inanan, güvenen sevgili annem ve babam Zeliha AVŞAROĞLU ve Hasan AVŞAROĞLU'na, kardeşlerime, aileme ve arkadaşlarıma en içten şükranlarımla teşekkür ederim.

Doktora eğitimimde burs imkânı sağlayan YÖK 100/2000 "Sürdürülebilir ve Etkin Tarım" ve TÜBİTAK 2211-C "Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı" programına teşekkür ederim. Bu çalışmanın finansal desteğini sağlayan Selçuk Üniversitesi BAP birimine sunulan BAP-19201069 proje numarasıyla desteklenmiştir.

Zuhal Zeynep AVŞAROĞLU
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
2.1. Tuz Stresinin Bitkiler Üzerindeki Etkileri	8
2.2. Toprakta Bor ve Borun Bitki Metabolizmasındaki Önemi	11
2.3. Bor Stresinin Bitkilerde Meydana Getirdiği Fizyolojik ve Biyokimyasal Tepkiler	14
2.4. Tuz ve Bor Stresinin Bitkiler Üzerindeki Etkileri.....	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. Bitki Materyali	24
3.2. Metot	24
3.2.1. Tohum Ekimi.....	25
3.2.2. Tarama Denemeleri	25
3.2.3. Ana Denemenin Kurulması	26
3.2.4. Bitki Örnekleme	27
3.3. Analiz Yöntemleri	27
3.3.1. Gövde ve kök örneklerinin boyları, yaş ve kuru ağırlıklarının belirlenmesi	27
3.3.2. Gövde örneklerinde besin elementi içeriklerinin belirlenmesi.....	28
3.3.3. Bağlı su içeriği (RWC).....	28
3.3.4. Prolin içeriğinin belirlenmesi	29
3.3.5. Elektrolit Sızıntısının (EC) belirlenmesi	29
3.3.6. Lipid peroksidasyonun belirlenmesi (MDA)	29
3.3.7. Reaktif oksijen türlerinin (ROS) belirlenmesi.....	29
3.3.8. Antioksidan enzim aktivitelerinin belirlenmesi	30
3.4. Anatomik değişimlerin belirlenmesi	32
3.5. İstatistik Analizler	34
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	35
4.1. Tarama Denemesi Sonuçları	35

4.2. Ana Deneme.....	39
4.2.1. Büyüme Parametreleri.....	39
4.3. Reaktif Oksijen Türleri	58
4.3.1. Hidroksil radikali ($\cdot\text{OH}$) süpürülme aktivitesi	58
4.3.2. Hidrojen peroksit (H_2O_2) içeriği.....	61
4.4. Antioksidan Enzim Aktiviteleri	63
4.4.1. Süperoksit dismutaz (SOD) enzim aktivitesi	67
4.4.2. Peroksidaz (POX) enzim aktiviteleri.....	70
4.4.3. Katalaz (CAT) enzim aktiviteleri	72
4.4.4. Askorbat peroksidaz (APX) enzim aktiviteleri	75
4.4.5. Glutasyon Redüktaz (GR) enzim aktiviteleri.....	79
4.4.6. Oksitlenmiş glutasyon (GSSG) içeriği	82
4.4.7. Glutasyon (GSH) içeriği	85
4.5. Bitki Besin Elementleri	88
4.5.1. Gövde Ca, Mg ve K konsantrasyonları	91
4.5.2. Gövde Na, Cl ve B konsantrasyonları ve kaldırılan miktarları	96
4.6. Anatomik Bulgular.....	104
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	112
5.1 Sonuçlar	112
KAYNAKLAR	116

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

kg	Kilogram
g	Gram
L	Litre
ml	Mililitre
µg	Mikrogram
µmol	Mikromolar
mM	Milimolar
cm	Santimetre
dk	Dakika
s	Saniye
ha	Hektar
%	Yüzde
Ca	Kalsiyum
Mg	Magnezyum
K	Potasyum
Na	Sodyum
Cl	Klor
B	Bor
O ₂ • ⁻	Süperoksit
¹ O ₂	Tekil oksijen
OH•	Hidroksil radikalleri
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
ppm	Parts per million (milyonda bir)
B(OH) ₃	Borik asit

Kısaltmalar

APX	Askorbat peroksidaz
ATP	Adenozin trifosfat
AsA	Askorbik asit

CAT	Katalaz
DAB	3.3'-diaminobenzidin tetrahidroklorid
DHAR	Dehidroaskorbat redüktaz
DHA	Dokosahekzaenoik Asit
EDTA	Etilen Diamin Tetra Asetik Asit
GR	Glutasyon redüktaz
GS	Glutamin sentetaz
GSSG	Okside glutasyon
GST	Glutasyon s-transferaz
MDA	Malondialdehit
MDHAR	Monodehidroaskorbat redüktaz
NADPH	Nikotinamid adenin dinükleotit fosfat
NBT	Nitrobluetetrazolium
POX	Peroksidaz
PVPP	Polyvinylpolypirrolidone
ROT	Reaktif Oksijen Türleri
SOD	Süperoksit Dismütaz
TCA	Trikloroasetik asit
TBA	Tiobarbitürik asit
B1	Kontrol (0.0033 mM B)
B0	Yetersiz B (0 mM B)
B2	Yeterli B (0.5 mM B
B3	Toksik B (4 mM B)
T+B1	150 mM NaCl + 0.0033 mM B)
T+B0	150 mM NaCl + 0 mM B
T+B2	150 mM NaCl + 0.5 mM B
T+B3	150 mM NaCl + 4 mM B

1. GİRİŞ

Mısır, insanlar tarafından günümüze kadar yetiştirilen en eski tahıl ürünlerindendir. Orijini, yaklaşık 10.000 yıl öncesine kadar dayanan Meksika dağlık kesiminde teosint (*Zea mays* L. spp. mexicana) adı verilen yabani bir otsu bitki olarak yetiştirildiği Mezoamerika Bölgesi olduğuna inanılmaktadır (Pesireron ve ark., 2021). Mısırın, 15. yüzyılda Avrupa'nın Amerika'yı keşfinden sonra Dünyaya yayıldığı bilinmektedir. İlkel toplulukların kurulmasına da sebep olan tarımın başlangıcı ile üreticiler, doğadan seleksiyon yoluyla uygun tahıl tiplerini seçmek suretiyle bugünkü mısırın gelişmesinde katkı sağlamışlardır (García-Lara ve Serna-Saldivar, 2019).

Günümüzde mısır dünya çapında en fazla tüketilen ikinci tahıl ürünüdür (Erenstein ve ark., 2022). Ayrıca bir C4 bitkisi olan mısır geniş ekim alanına sahip olmasının yanında yüksek verim potansiyeli olan bir bitkidir. Mısır (*Zea mays* L.), dünyada olduğu gibi ülkemizde de en önemli tahıl ürünü olup, çeşitli toprak ve iklim koşulları altında yetiştirilmektedir. Mısır yem sanayisinde, gıda sektöründe, nişasta bazlı şeker (NBS), yem ve alternatif biyoyakıt üretimi gibi çok yönlü kullanım alanları olan, adaptasyon yeteneği ve verimliliği sayesinde üretimine dikkat edilmesi gereken bir sıcak iklim tahılıdır.

Mısır dünyada en fazla talep edilen ürün olması nedeniyle yıllık hacim olarak da hızla büyüyen tahıllar arasında yer almaktadır (Martinez ve Fernandez, 2019). Uluslararası Hububat Konseyi (IGC) verilerine göre dünyada mısır üretimi 2022/2023 yıllarında küresel mısır üretimi 1,184 milyar ton iken ülkemizde 6,75 milyon tona ulaşmıştır.

Ülkemizde tahıllar içerisinde buğday ve arpadan sonra en geniş ekim alanına sahip olan mısır, ana ürün ve ikinci ürün olarak başarıyla üretilmektedir. Ayrıca mısırdaki verim artış nedenleri arasında üreticilerin modern mısır üretim tekniklerini uygulamaya koyması, hibrit tohum kullanımının yaygınlaştırılması, mısır üretiminin sulanan alanlara kaydırılması ve belli düzeylerde gübre kullanımının sağlanması olarak sıralanabilir.

Geçmiş yıllarda Akdeniz Bölgesi'nde mısır üretiminin yaygınlaştırılması, son yıllarda özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki mısır ekim alanlarının yoğunlaşması ve ülke genelinde verim artışıyla mısır üretiminde gözle görülür bir artış olmuştur (Kılınç

ve ark., 2018). Türkiye, mısırın ana vatanı olmamasına rağmen, sarı ve beyaz atdışı, sarı sert, cin mısır ve şeker mısırında yerel popülasyonlar mevcuttur. 1926'lı yıllarından itibaren farklı bölgelerden toplanan mısır popülasyonları Sakarya Mısır Araştırma Enstitüsünde (MAE) bulunan gen bankasında muhafaza edilmektedir. Mısır bitkisinin genetik kaynakların muhafazası ve ıslah çalışmaları sonucunda geliştirilen çeşitleri ve hatları tescil ettirmek devamlılığını sağlamak, kamu-özel sektörde tohumculuk firmalarının talep ettiği ileri kademe tohumların üretimi sağlanmaktadır.

Birleşmiş milletler dünya nüfusunun 2050 yılında yaklaşık olarak 9.9 milyara ulaşacağı tahmin edilmektedir. Nüfusta meydana gelen bu artış beslenme, gıda, üretim ve enerjiye olan talebin artışını beraberinde getireceğinden dolayı tarımsal üretimin artırılması gerekmektedir. Tarımsal üretimin en önemli kaynağı olan topraklar işleme, sulama, gübreleme ve toprak kökenli hastalıkları engelleyebilmek için yapılan uygulamalar ile verimli hale getirilmeye çalışılmaktadır. Ancak bitkisel üretimi artırmak için bitkiler tarafından kaldırılan besin elementlerinin toprağa fazla verilmesi ve kimyasal gübrelemelerin hatalı uygulamaları giderek artış göstermektedir. Ayrıca topraklara ihtiyaçtan fazla uygulanan kimyasal gübreler besin elementlerinin arasındaki dengenin bozulmasıyla tuzluluğa neden olan etkenler arasında yer almaktadır. Tuzluluk, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde dünya genelinde tarımsal üretimi sınırlandırarak tehdit altına alan çevresel bir stres faktörüdür.

Tuzluluk, dünya yüzeyindeki alanları etkileyen, hem tarımsal verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirliği etkileyen önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya genelinde 833 milyon hektardan fazla alan tuzdan etkilenmekte olup bu sayı her yıl 1,5 milyon hektar daha artış göstermektedir (FAO 2021). Ayrıca, dünya genelinde ekili ve sulanan arazilerin yaklaşık %20-33'ünün tuzluluktan etkilendiğini ve bu olumsuz etkilerin 2050 yılında %50'ye ulaşması beklenmektedir. Ülkemizdeki toprakların %1.7'sinde (1.518.746 ha), tarım yapılan arazilerin ise %3.8'inde (837.405 ha) tuzluluk problemlerine rastlanmaktadır (Karaoğlu ve Yalçın, 2018). Diğer taraftan çorak araziler ülkemiz yüzölçümünün %2'sine, toplam işlenen arazilerin % 5.48 (27.699.003 ha)'ini oluşturmaktadır. Toplamda çorak arazilerin % 74'ü tuzlu, % 25.5'i tuzlu-alkali ve

% 0.5'i alkali (sodyumlu) topraklardan meydana gelmektedir (Çullu ve ark., 2015). Bu rakamlar tuzluluk sorununun ciddiyetini ve küresel gıda güvenliği üzerindeki potansiyel etkisini ortaya koymaktadır. Tuz stresi bitki büyümesini engelleyerek anormal

gelişmeye ve metabolik bozulmalara neden olmaktadır (van Zelm ve ark., 2020). Tuz stresi zararlı etkilerini öncelikle ozmotik stresle gösterebilir daha sonraki aşamada Na ve Cl gibi fitotoksik iyonların uzun süreli birikimiyle kendini gösterebilmektedir. Tuz stresinin neden olduğu ozmotik stres, tuzların artan alımına ve kök bölgesindeki su potansiyelinin azalmasına bağlı olarak bitki hücrelerinde su iletkenliğini azaltarak bitki büyümesinin engelleyebilmektedir. Bitkiler yüksek tuzluluğa uzun süre maruz kaldığında Na^+ , Cl^- ve SO_4^{2-} gibi toksik iyonların birikimiyle iyon toksisitesine neden olarak besin elementlerinin alımını bozarak bitki hücrelerindeki ve dokularındaki hasarı şiddetlendirir (Balasubramaniam ve ark., 2023).

Tuzluluk bitkiler tarafından su alımını engelleyerek bitkinin büyümesini ve toprağın fiziksel koşullarının bozulması doğrudan etkilemektedir (Litalien ve Zeeb., 2020). Bu durum bitkilerin gelişimini, büyümesini ve üremesi gibi birçok yönden olumsuz etkileyerek tuz stresine neden olabilmektedir. Tuz stresi hücre içi ozmotik basıncı artırarak sodyumun toksik seviyelerde birikimlerine yol açmaktadır. Bitkilerde tuz stresi beslenme bozuklukların, hormonal dengesizliklere, iyon toksisitesine, oksidatif strese ve bitkilerin hastalıklara karşı duyarlılığında artışa neden olabilmektedir. Bitkilerde tuz stresi toprağın gözenekliliğinin ve hidrolik iletkenliğinin değişimi toprağın su potansiyelinin düşürmesiyle su stresine neden olmaktadır.

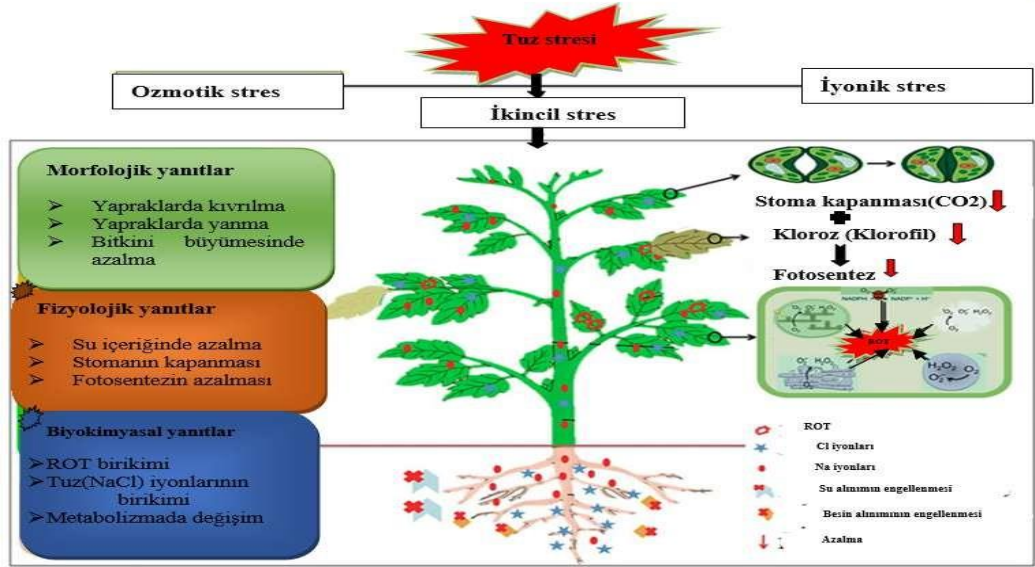
Tuz stresi bitkilerde çeşitli metabolik değişimlere, fotosentez etkinliğine, çimlenme ve diğer biyosentetik süreçleri engelleyerek bitkinin büyümesini ve gelişiminin azalmasına neden olabilmektedir. Ayrıca tuz stresi koşullarında bitki hücreleri prolin gibi uyumlu çözünen maddeler biriktirerek stresin olumsuz etkilerine karşı koruma sağlayabilir. Topraktaki aşırı tuzlar, kök yüzeyindeki ozmotik potansiyelin azalması nedeniyle bitkilerin su alımını azaltır. Bu, stomaların kapanmasına ve sürgün büyümesinin azalmasına yol açan erken ozmotik stres aşamasını karakterize eder (Şekil 1.1). Bitki su alımı ulaştığında, yaprak yüzeyindeki terleme sonucu oluşan su potansiyelindeki değişimin yönlendirdiği terleme akımıyla birlikte sürgüne taşınır (Shelp ve ark. 1995). Tuz stresi koşullarında Na^+ ve Cl^- iyonlarının rekabeti nedeniyle besin elementlerinin alımını zorlayabilmektedir. İyonik streste, Na^+ ve Cl^- gibi iyonların artan seviyeleri iyon homeostazisinde dengesizliğe (K^+ , Zn^{+2} , Mn^{+2} ve Mo^{+2}) hücrelerde birikmesiyle bitkinin büyümesi ve metabolizması için gerekli olan temel besin elementlerinin bulunmaması nedeniyle membran yapılarını ve hücresel organelleri

bozarak iyonik toksisiteyi tetiklemektedir (Yan ve ark., 2020).

Tuz stresinde bu tür etkileşim sıklıkla Ca, K ve Mg eksiklikleriyle sonuçlanmaktadır (Qadir ve ark., 2007). Böylece bitkilerde yaprak yaşlanması, enzimatik aktivitenin engellenmesi, besin elementlerinin azalması, fotosentetik ve terleme oranlarında değişikliklere yol açmaktadır (Yan ve ark., 2020). Tuz stresi bitkilerde fotosentez yoluyla karbonhidratları sentezleyemez bu nedenle bitkinin büyümesini ve gelişimini olumsuz etkilemektedir (Huang ve Salt., 2016). Bitkilerde tuz stresi stoma iletkenliğinin bozulmasıyla fotosentetik aktiviteleri azaltmakta ve reaktif oksijen türlerinin (ROT) oluşumunu artırarak hücrel yapıları zarar verebilmektedir. Bu durum bitkilerde aşırı ROT konsantrasyonu, hücre organelleri ve membranlarının yanı sıra bitki hücre bileşenlerinin oksidasyonu ile oksidatif strese neden olmaktadır (Sachdev ve ark., 2021). Bitkiler stresten korunmak ve hücrenin biyokimyasal faaliyetlerini düzenlemek için süperoksit radikali ($O_2^{\bullet-}$), hidrojen peroksit (H_2O_2), hidroksil radikali ($\bullet OH$) gibi ROT'un aşırı üretimini durdurması gerekmektedir (Liu ve ark., 2019). Bitkiler, antioksidan savunma mekanizması ile ROT, serbest radikalleri (süperoksit radikalleri, $O_2^{\bullet-}$; hidroksil radikali, $\bullet OH$; perhidroksil radikal, HO_2 ve alkoksi radikalleri, RO) ve serbest olmayan radikalleri (peroksit H_2O_2 ; singlet oksijen O_2 gibi) oluşumunu hücreden uzaklaştırılması arasındaki dengeyi koruyabilmektedir. Antioksidan savunma mekanizması enzimatik (süperoksit dismutaz, SOD; peroksidaz, POX; katalaz CAT; askorbat peroksidaz, APX; glutatyon redüktaz, GR; monodehidroaskorbat redüktaz, MDHAR; dehidroaskorbat redüktaz, DHAR; glutatyon peroksidaz, GPX; guaiakol peroksidaz, GPOX; ve glutatyon-S-transferaz, GST) ve enzimatik olmayan (askorbik asit, AsA; glutatyon, GSH; fenolik bileşikler; alkaloidler; flavonoidler; karotenoidler; protein olmayan amino asitler ve tokoferoller) antioksidan enzim mekanizmalarıdır.

Tuz stresinde, ozmotik stres ile iyon toksisitesinin bir araya gelmesiyle, bitkilerin çimlenmesini, büyümesini ve gelişimini bozabilecek sekonder streslerin oluşmasından sorumludur (Wichelns ve Qadir, 2015; Assaha ve ark., 2017). ROT ve ROT türevleri proteinler, lipidler ve nükleik asitler gibi farklı hücrel bileşenleri parçalama ve bitkilerin yapısal bütünlüğünü bozma yeteneğine sahiptirler (Kumar ve Sharma, 2020). Sonuçta her iki tuz stresi bitkilerin ozmotik ve iyon dengesini bozarak morfolojik (bodur büyüme, kloroz ve bozulmuş tohum çimlenmesi), fizyolojik (fotosentezin engellenmesi ve besin dengesizliği) ve biyokimyasal (oksidatif stres, elektrolit sızıntısı ve membran

düzensizliği) değişimlere neden olarak bitkinin büyümesini ve gelişmesini engelleyen önemli bir abiyotik stres faktörü olarak karşımıza çıkmaktadır (Tang ve Zhang, 2022)



Şekil 1.1. Tuzluluk stresine karşı bitkide meydana gelen morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal tepkiler (Chele ve ark., 2021)

Özellikle sodyum (Na) ve klor (Cl) iyonlarının toprakta birikmesine, su ve besin elementlerinin emilimini engelleyerek, hücre sel su durumunun bozulmasına (ozmotik stres) ve aşırı iyon toksisitesine neden olmaktadır. Makromoleküllere zarar veren ROT, aşırı üretiminin yanında tuzluluk stresinin ortaya çıkan ikincil etkilerinde stomaların kapanmasına, su içeriğinin azalmasına ve kloroza neden olarak fotosentetik aktiviteyi azaltmaktadır. Klorofil bu içeriğindeki azalmayla artan ROT klorofilin oksidasyonunu, fotosentetik proteinleri ve fotosistem düzeneğini değiştirmektedir (Huihui ve ark., 2020). Ayrıca yüksek konsantrasyonlarda tuz stresinde tilakoid şişmeyi ve nişasta birikimini indükleyerek kloroplast yapısının dinamiklerini bozar (Goussi ve ark., 2018).

Bitkiler, olumsuz çevresel koşullara karşı hayatta kalabilmek, stres faktörlerini algılamak ve bunlara yanıt verebilmek için antioksidan savunma sistemi geliştirmişlerdir. Antioksidan enzimlerin aktiviteleri için bor, selenyum, demir, çinko ve manganez gibi mikro besin elementleri gerekebilmektedir. Bu nedenle mikro besin elementlerinin yetersiz alınımı hücrede antioksidan kapasitesinin azalmasına yol açabileceği ileri sürülmektedir (Prior, 2015). Mikro

besin elementleri küçük miktarlarda gerekli olmalarına rağmen noksanlıklarında bitkinin gelişimi ve çevresel stresle başa çıkma yeteneklerini bakımından önemlidir. Mikro besin elementlerindeki dengesizlik bitkilerin hem biyotik (patojenler ve zararlılar gibi) hem de abiyotik (yüksek ışık, UV radyasyonu, kuraklık, tuzluluk, sel ve soğuklama gibi) çevresel streslere karşı direncini azaltabilir (Hajiboland, 2012). Önemli mikro besin elementleri arasında yer alan bor (B) bitkinin büyümesi ve gelişmesinde rol oynamaktadır. Bor kuru yaprak dokusundaki konsantrasyonu 10 ila 75 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir (Arunkumar ve ark., 2018). Bor, hücre duvarı biyosentezine ve yapısal bütünlüğe katılır (Pereira ve ark., 2022). Ayrıca hücre duvarının gözenekliliğini ve esnekliğini artıran rhamnogalakturnan (RG-II) ile borat esterlerinin oluşumuyla ilgilidir (Nejad ve Etesami, 2020)

Bor bitkilerde üreme dokularının uyarılmasında, tohum kalitesinde, membranlar boyunca iyon akışında, hücre bölünmesinde ve uzamasında, protein hücre iskeleti fonksiyonunda, antioksidanların, askorbik asit ve polifenollerin metabolizmasında, şeker taşınmasında, oksidoredüktaz aktivitesinde ve diğer süreçlerin yanı sıra bitki hormonlarının biyosentezi ve taşınması görev aldığı belirlenmiştir (Shireen ve ark.,2018).

Bor, bitkilerin büyümelerinde, kimyasal bileşimlerinde ve antioksidan savunma kapasitelerinde değişikliklere yol açabilmektedir. Tuz stresi koşullarında borun bitkide meydana getirebileceği fizyolojik ve biyokimyasal değişimleri bilinmemektedir. Özellikle tarımda bitkilerin strese toleransı önemli bir araştırma alanıdır. Bu nedenle tez çalışmamızda tuz stresi (150 mM NaCl) koşullarında bor uygulamalarının (0 mM B, 0.50 mM B ve 4 mM B) mısır genotiplerinde (MAE 103 ve MAE 45) fizyolojik, biyokimyasal ve tolerans mekanizması üzerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca tuz stresinin neden olduğu hasarlanmalara karşı bor uygulamalarının koruyucu etkisi araştırılmıştır. Sakarya Tarımsal Araştırma Enstitüsü'nden gelen 120 adet farklı mısır genotiplerinin bora ve tuza olan tepkileri su kültürü ortamında belirlenmiştir. Genel tarama aşamasında, 120 adet farklı mısır genotipinin büyüme parametreleri ve fizyolojik değişimler bakımından değerlendirilmiştir. Taramalar sonucunda MAE 103 mısır genotipi (B toksitesine toleranslı ve tuza dayanıklı) ve MAE 45 mısır genotipi (B toksitesine toleranssız ve tuza dayanıksız) olarak belirlenen mısır genotipleri ile

ana deneme kurulmuştur. Çalışmamızda mısır genotiplerinin temel büyüme parametreleri (kök boyu, gövde boyu, yaş ve kuru ağırlıkları), gövde kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), potasyum (K), sodyum (Na), klor (Cl) ve bor (B) içerikleri, bağıl su içerikleri (RWC), prolin içerikleri, elektrolit sızıntısı (EC), malondialdehit (MDA) miktarları, antioksidan enzimler süperoksit dismutaz (SOD), askorbat peroksidaz (APX), katalaz (CAT), peroksidaz (POX), glutatyon redüktaz (GR) , Glutatyon (GSH) ve okside glutatayon (GSSG) içerikleri belirlenmiştir. Bitkilerde hidrojen peroksit (H_2O_2) ve hidroksil radikali ($\bullet OH$) gibi reaktif oksijen türlerinin yanında yaprakların anatomik yapılarında meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Tuz Stresinin Bitkiler Üzerindeki Etkileri

Tuz stresi, bitkinin büyümesi ve gelişimini engellemesinin yanında bitkinin ürün kalitesi ve verimliliğini önemli ölçüde sınırlandıran abiyotik stres faktörleri arasında yer almaktadır. Tuz stresin bitkinin genotipi, gelişim aşaması ve tuz konsantrasyonu gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak adaptasyon mekanizmaları geliştirmişlerdir. Tuz stresi meristem hücrelerinin sayısının azalmasına neden olarak besin elementlerinin alımını olumsuz yönde etkileyerek bitkinin büyümesini ve gelişimini engelleyebilmektedir (Balasubramaniam ve ark., 2023). Tuz stresinin bitkiler üzerindeki etkileri morfolojik (bodur büyüme, kloroz ve tohumun çimlenmemesi), fizyolojik (fotosentez azalma ve iyon dengesizliği) ve biyokimyasal (oksidatif stres, elektrolit sızıntısı ve membran düzensizliği) özelliklerinde ortaya çıkmaktadır (Tang ve Zhang, 2022).

Khan ve ark. (2003), yetiştirme kabinde 100 adet farklı mısır çeşitinde tuz stresi koşullarında (0 mM, 60 mM, 80 mM ve 150 mM NaCl) bitkinin büyüme ve gelişimleri üzerine etkileri incelenmiştir. Tuz uygulamaları sonucunda bitkilerin kök ve gövde boylarında azalmalar olduğu belirlenmiştir.

Benavente ve ark. (2004), yetiştirme kabinde W 64A mısır hattına farklı tuz dozlarında (100 mM, 250 mM, 500 mM, 750 mM, 1000 mM NaCl) 24, 36 ve 72 saat tuz stresine maruz bırakılan bitkilerin gövde yaş ağırlık değerleri artan tuz dozlarına bağlı olarak azalış gösterdiği belirlenmiştir.

André ve ark. (2006), tuz stresi (100 mM NaCl) koşullarında yetiştirilen iki mısır genotipinin BR5033 (tuza dayanıklı) ve BR5011 (tuza hassas) yapraklarındaki antioksidan enzim aktiviteleri incelenmiştir. Tuz stresi koşullarında mısır genotiplerinin SOD, APX, GPX ve GR antioksidan enzim aktiviteleri artış gösterdiği belirlenmiştir. Enzim aktivitelerindeki bu artış, tuza dayanıklı olan genotipte daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Carpıcı ve ark. (2010), serada denemesinde tuz stresi (100 mM NaCl) koşullarında yetiştirilen altı mısır (Zea mays L.) çeşidinin (Ada-523, Bora, C-955, PR 3394, Progen-1550 ve Trebbia) gövde ve kök kuru ağırlıkları, stres tolerans indeksleri, toplam klorofilleri, prolin içerikleri, besin elementlerinden Na ile K konsantrasyonları ve K\Na

oranları belirlenmiştir. Bitkiler tuz stresi koşullarında gövde ve kök kuru ağırlıkları toplam klorofil miktarları azaldığı belirlenmiştir. Tuz stresi koşullarında mısır çeşitlerinin prolin içerikleri artarken, bu artış Ada-523 çeşidinde daha fazla oranlarda olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Na konsantrasyonları gövdede daha yüksek oranlarda iken K konsantrasyonları ve K/Na oranının tuz stresi altında azaldığını bildirmişlerdir.

Khalil (2011), hidroponik ortamda mısır genotiplerine (EV78 , R-2303, KS-64 ve R-2315) tuz stresi (75 mM NaCl) koşullarında bor (0.05 mM B, 2.5 mM B ve 5 mM B) uygulamalarında bitkinin fizyolojik ve biyokimyasal özellikleri incelemiştir. Tuza dayanıklı EV-78 ve tuza hassas KS-64 mısır genotipleri tuz stresi koşullarında bor uygulamalarında EC değerlerinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Tuz stresi koşullarında bor uygulamalarında hassas ve toleranslı mısır genotiplerinin EC değerleri azalma gösterirken bu azalma tuza toleranslı genotiplerde daha az oranlarda olduğunu belirlemişlerdir.

Wang ve ark. (2017), bitki yetiştirme odasında altı mısır çeşidinin (Luyu39, Huanong138, Xianyu335, Aoyu3007, Yayu8, Jinping618) tuz stresi koşullarında 0, 45, 95, 145, 195, 245 ve 295 mM NaCl uygulanarak antoksidanlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tuz stresi koşullarında tuza dayanıklı Luyu 39 çeşidi ve Jinping 618 tuza hassas olarak belirlemiştir. Luyu 39 mısır çeşidi 245 mM ve 295 mM NaCl seviyelerinde Jinping 618 ile karşılaştırıldığında daha düşük MDA ve prolin içeriğine, daha yüksek antioksidan enzim (SOD, CAT ve POX) aktivitelerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Naeem ve ark. (2017), kurak koşullar altında Dekalb-6525 (kuraklığa dayanıklı) ve Yousafwala-hybrid (kuraklığa hassas) mısır genotiplerine yapraktan B (0. 2. 4 ve 6 mg L-1) dozlarının uygulanmıştır. Kurak koşullarda B uygulamalarıyla POX enzim aktivitesi Yousafwala-hybrid genotipine göre DK-6525 genotipinde daha fazla artış gösterdiğini belirlemişlerdir. B, bitkilerde biyokimyasal ve fizyolojik reaksiyonu için önemli bir element olmasının yanında NaCl kaynaklı tuzluluğun olumsuz etkisini azaltığını bildirmişlerdir (Iqbal ve ark ., 2020).

Cai ve ark. (2019), sera koşullarında tuz stresi (100 mM NaCl) koşullarında kendilenmiş mısır tohumlarına USTB-109 (orta derecede tuza dayanıklı mısır), USTB-297 (tuza dayanıklı mısır) ve USTB-265 (tuza duyarlı mısır) uygulanarak antioksidan

enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. SOD, CAT ve APX aktiviteleri tuza dayanıklı (USTB-297) mısır antioksidan enzim aktiviteleri, tuza hassas (USTB-265) ve orta derecede tuza toleranslı (USTB-109) mısır bitkisine göre daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Xiaozhou ve ark. (2020), tuz stresi koşullarında (0, 100 ve 200 mM NaCl) mısır bitkisinin büyümesi ve gelişmesi üzerindeki etkilerinin incelendiğinde tuz uygulamalarına bağlı olarak EC değerlerinde artışlar olduğunu belirlemişlerdir. Sera koşullarında soya bitkisine (*Glycine max* L.) tuz stresi koşullarında 150, 300 ve 450 mM NaCl GR enzim aktivitesi artan tuz dozlarında kontrole göre sırasıyla %45, %126 ve %228 oranlarında artış gösterdiğini belirlemişlerdir (Alharby ve ark., 2021).

Punia ve ark. (2021), sera koşullarında tuza toleranslı SSG 59-3 ve tuza hassas PC-5 mısır genotiplerine farklı tuz konsantrasyonları (60, 80, 100 ve 120 mM NaCl) uygulanmıştır. Mısır genotiplerinde artan tuz konsantrasyonlarına bağlı olarak GSSG içeriğinde artışlar meydana gelmiştir. Kontrole göre GSSG içeriğinde 100 mM NaCl uygulamasında SSG59-3 ve PC-5 mısır genotiplerinin yapraklarında sırasıyla %55 ve %25 oranlarında artışlar olduğu belirlenmiştir. GSSG içeriği tuza toleranslı olan SSG59-3 mısır genotipinde daha yüksek oranlarda olduğunu bildirmişlerdir.

Hussain ve ark. (2022), sera ortamında tuz stresi (0, 3, 6 ve 9 dSm⁻¹) koşullarında mısır genotiplerine (SB-9617, YH-1898 ve NCEV-1530-9) uygulanarak tohumun çimlenmesi ve fide büyümesi üzerinde etkilerinin incelenmiştir. Tuz uygulamalarına bağlı olarak mısır genotiplerinin RWC değerlerinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Pingle ve ark. (2022a), tuz stresi koşullarında (50 mM, 100 mM, 150 mM, 200 mM ve 250 mM NaCl) mısır çeşitlerinin (Syngenta 7720, Syngenta 6668, eco-91, Syngenta 7710 ve Advanta Pac 751 Vertex 751) artan tuz konsantrasyonlarında mısır çeşitlerinin prolin içeriklerinde artış gösterdiklerini bildirmişlerdir.

Kthiri ve ark. (2022), sera koşullarında iki hibrit mısır çeşit (Sancia ve Agrister) farklı tuz seviyeleri 0, 2, 4 ve 6 g NaCl L⁻¹ altında yetiştirilmiştir. CAT ve POX antioksidan enzim aktiviteleri kontrole göre tuz stresinde Agrister çeşidinde artış gösterirken, Sancia çeşidinde POX ve CAT enzim aktiviteleri azalma gösterdiği belirlenmiştir. Agister mısır çeşidi Sancia mısır çeşidine göre tuza daha toleranslı olduğunu bildirmişlerdir.

2.2. Toprakta Bor ve Borun Bitki Metabolizmasındaki Önemi

Dünya bor rezervlerinin %72'sine sahip olan Türkiye'nin toplam B üretimindeki payı %33'tür. Bor tarım alanlarında gübrelerde bitki besini olarak kullanılan bitkinin büyümesi ve gelişmesi için gerekli bir mikro besin elementlerindendir. Ülkemiz topraklarının yaklaşık %85.5'inde yüksek pH, %56.4'ünde aşırı kireç, %61.9'unun ağır bünyeli (killi-tın-kil) ve %94'ünün de organik madde bakımından düşük düzeyde olması, bitkiler için yeterlilik ve toksisite sınırı oldukça dar olan B'un tarımsal üretimde ürün arttırıcı olarak kullanmanın önemini arttırmaktadır (Barut ve ark., 2018). Gezgin ve ark. (2002), Konya topraklarının B kapsamlarının belirlenmesi için yaptıkları bir çalışmada, ortalama olarak 2.48 ppm B içerdiklerini ve toprakların elverişli B kapsamının %26.5'inde yetersiz (5 ppm) düzeyde olduğunu bildirmişlerdir.

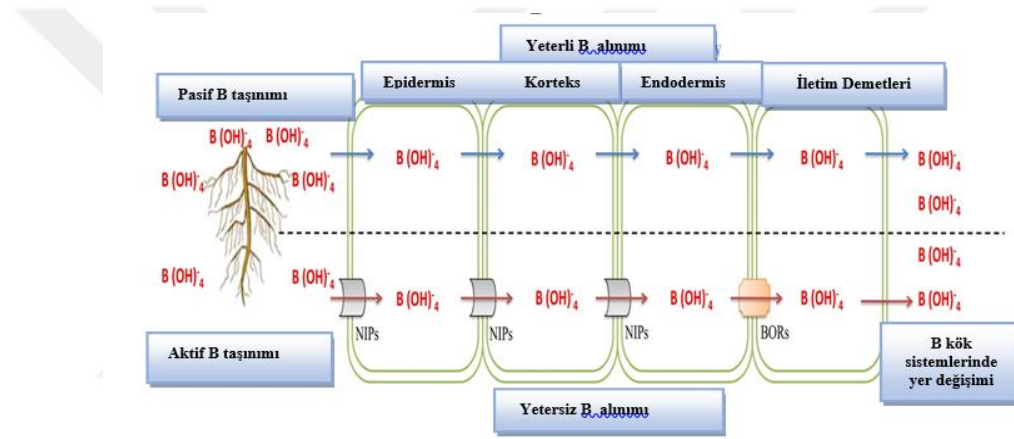
Bor topraklarda değişik formlarda bulunmaktadır ve birkaç kategoriye ayrılarak topraklarda bor fraksiyonu ve her bir fraksiyonun bitkiye elverişliliği birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Harmankaya ve Gezgin, 2005; Patra ve ark., 2018) Bor bir mikro elementtir ve kurutulmuş yaprak dokusundaki konsantrasyonu 10 ila 75 mg kg⁻¹ arasında değişmektedir (Arunkumar ve ark., 2018).

Bor, hücre duvarının biyosentezini, yapısal bütünlüğünü, hücre duvarının gözenekliliğini ve esnekliğini artıran rhamnogalakturonan (RG-II) ile borat esterlerinin oluşumuyla ilgilidir (Nejad ve Etesami, 2020; Pereira ve ark.,2022) Yüksüz borat molekülleri, iki farklı RG-II monomeriyle ester bağları kurarak RG-II'nin oluşmasını sağlamaktadır. İki homogalakturan zincirinde bor hücre duvarı oluşumu için gerekli olan pektin polisakkarit ağlarını geliştirmektedir (Funakawa ve Miwa, 2015).Bu bağlantı aynı zamanda hücre duvarı fonksiyonuna da katkıda bulunur ve gözenekliliğini,esnekliğini, hücreler arası yapışmayı, iyon bağlamayı ve su tutma kapasitesini belirlemektedir (Kobayashi ve ark., 2018). Yetersiz B koşullarında bitkilerde normal hücre bölünmesi meydana gelebilmekte ancak hücre farklılaşmasına geçilmez böylece yaprak veya gövde oluşumuna uygun hücrelerin oluşmasına neden olur (Jehangir ve ark., 2017).

Bor, bitkilerin büyümesi, gelişmesi ve ürünlerin kalitesi için gerekli bir elementtir (Shireen ve ark., 2018;Pereira ve ark, 2022). Topraklarda borik asit [B(OH)₃] ve tetrahidroksi borat [B(OH)₄]- formlarda bulunarak toprağın pH'ına bağlı olarak toprak

çözeltisinde organik ve mineral fraksiyonlarında eşit olmayan şekilde dağılmaktadır (Hrmova ve ark., 2020). Bitkiler tarafından borik asit formunda alınan B, normal B koşullarında genellikle pasif difüzyon yoluyla girer ; ancak, B toksik ortamında bitkiler içinde B'nin hareketi için borik asit kanalları ve borat taşıyıcılar gereklidir (Pandey ve ark., 2019).

Bor, topraktaki en hareketli ve çoğunlukla en eksik mikro elementlerden biri olarak kabul edilir (Wimmer ve Eichert, 2013;Hrmova ve ark,2020). Bitki, B'yi plazma zarındaki kanallar yoluyla $[B(OH)_3]$ olarak emer ve spesifik taşıyıcılar aracılığıyla $[B(OH)_4]^-$ 'ü dışarı aktarır (Yoshinari ve Takano, 2017).



Şekil 2.1. Kök sistemlerinden borun alınımı ve taşınımı (S. Kohli ve ark., 2022)

Bor, bitkilerin plazma zarında mevcut olan glikoproteinlere, glikolipidlere ve fosfoinositidlere bağlanarak alanlarının stabilitesini etkiler (Brown ve ark., 2002). Bitkiler tarafından, pektin molekülünün rhamnogalakturnan II (RG-II) alanında ayrıca çapraz bağ oluşturan $B(OH)_3$ olarak alınır (Kobayashi ve ark., 2018).

Bitkinin meristematik bölgeleri (kök uçları, tomurcuklar ve genç yapraklar) büyüme ve gelişme için bor gereksinimleri vardır. B, genç meristemlerde daha fazla ihtiyaç olması hücre bölünmesi ve uzaması önemli yer tutmaktadır. Ancak yetersiz B apikal meristemlerde büyümeyi durdurması kök büyümesini, çarpık çiçek ve meyve oluşumunu önemli ölçüde geciktirir (Shireen ve ark., 2018).

Bor bitki bünyesinde karbonhidrat ve protein metabolizmasında, doku farklılaşması, oksin ve fenol metabolizmasında, zar geçirgenliğinde, polen çimlenmesinde

ve polen tüpü büyümesinde önemli roller üstlenmektedir (Marschner, 2011). Fenol ve karbonhidrat metabolizması yakından ilişkilidir, çünkü fenol açısından zengin biyomoleküllerin oluşumu için gerekli öncüyü şikimik asit yolları yoluyla üretilmektedir (Lu ve ark., 2014).

Bor, bitkilerde membranlar boyunca iyon akışında, hücre bölünmesinde ve uzamasında, protein hücre iskeleti fonksiyonunda, antioksidanların, askorbik asit ve askorbat/glutasyon döngüsü, bitki hormonlarının biyosentezi ve taşınması gibi bir çok önemli süreçlerde yer almaktadır (Shireen ve ark., 2018).

Eggert ve von Wirén (2017), bor bitkide büyüme oksinleri, sitokininleri, giberlinleri, absisik asit ve brassinosteroidleri aktive ederek bitki hormonlarının metabolik yollarını güçlü bir şekilde etkilediğini bildirmişlerdir. Bor, tek çenekli bitkilerin hücre duvarlarında çift çenekli bitkilere göre daha az pektin içermesi nedeniyle nispeten daha düşük bor gereksinimleri ve bor toleransları olduğunu bildirmişlerdir (Chormova ve Fry, 2016).

Bor, hücresel membranların enzimatik ve protein işleyişine katılımı, membran bütünlüğünü sağlamaktadır. Ancak yetersiz B, $H^{+}/-ATPaz$ 'ın aktivitesini azaltarak membranlar boyunca elektrik potansiyeli gradyanlarını değiştirme ve iyonların, enzimlerin ve metabolitlerin taşınmasının azalmasına neden olmaktadır (Shaaban, 2010). Bor, $H^{+}/-ATPaz$ aktivitesini arttırdığı, böylece plazma zarı boyunca elektrokimyasal gradyanları koruduğunu belirlemişlerdir (Shireen ve ark., 2018). Plazma membranları, mikro elementin optimum konsantrasyonları altında güçlendirilir ve K^{+} iyonlarının alımını uyararak plazma membranına bağlı $ATPaz$ boyunca hareketliliği artırır. K^{+} iyonları stomaların açılıp kapanmasında görev alır. B'un, K^{+} akışını etkileyerek stoma açıklığını arttırabilir (Ahmad ve ark., 2009).

Çelik ve ark. (2019), tarafından yapılan araştırmada mısır bitkisine 0 mM, 0.25 mM, 0.50 mM ve 1 mM B uygulanmıştır. Mısırdaki borun kuru ağırlık verimi üzerinde olumlu bir etkisi 0.25 mM B dozunda belirlenirken yüksek dozlarda (0.50 mM ve 1 mM B) miktarları azaldığı belirlenmiştir.

Harmankaya ve ark. (2008), B eksikliği olan topraklarda (0,19 mg B kg^{-1} ile) altı fasulye (ehirali-90, Yunus-90, Karacaehir-90, Önceler-90, Göynük-98 ve Akman-98) genotipinin verimi ve bazı verim bileşenleri üzerinde üç B dozunun (0,0 $kg\ ha^{-1}$), toprak

uygulaması (3,0 kg ha⁻¹) ve yaprak gübrelmesi (0,3 kg ha⁻¹) etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bitki boyu, bitki başına bakla, bakla başına tohum, tohum verimi, protein içeriği, 100 tohum ağırlığı ve yapraklardaki B konsantrasyonu incelenmiştir. Verim, kontrole göre B uygulanan genotiplerde daha yüksek olmuştur. Hem topraktan hem de yaprakta B uygulamaları, verimi sırasıyla %10 ve %20 oranında artırdığını belirlemişlerdir.

Turan ve ark. (2018), sera koşullarında makarnalık (*Triticum durum* L. cv: Çakmak-79) ve ekmeklik (*Triticum aestivum* L. cv: Gerek- 79) buğday çeşitlerine üç farklı bor dozunu (0, 1 ve 10 mg kg⁻¹ B) denemişlerdir. Uygulamaları sonucunda 1,0 mg B kg⁻¹ düzeyinde B uygulamaları her iki çeşidin de kuru ağırlıklarını artırırken yüksek düzeyde B uygulaması (10 mg B kg⁻¹) ise kuru ağırlıkları önemli ölçüde azaltmıştır. Yaprak ucundaki B konsantrasyonu ve alımı, B uygulamasında artarken, her iki çeşitte de kalsiyum (Ca) konsantrasyonu ve alımı azalmıştır. Bitki hücre duvarında önemli miktarda B biriktiği gözlenmiştir. Yaprak uçlarına benzer şekilde, hücre duvarındaki B konsantrasyonları da B uygulaması ile artarken, Ca konsantrasyonu azaldığını belirlemişlerdir.

Gunes ve ark. (2004), tarafından sera koşullarında sekiz farklı mısır çeşidine (Furio, Riogrande, Sele, DK 743, Helix, Missouri, Betor ve Poker) farklı B dozlarında (0, 10 ve 30 ppm B) H₃BO₃ uygulanan bitkinin gelişimi üzerine etkilerinin incelendiği araştırmada bitkinin gövde yaş ağırlık değerleri artan bor dozlarında azalmalar gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca mısır çeşitleri B uygulamalarına bağlı olarak gövde yaş ağırlıklarında meydana gelen azalmalarda önemli genetik farklılıklar olduğunu belirlemişlerdir.

2.3. Bor Stresinin Bitkilerde Meydana Getirdiği Fizyolojik ve Biyokimyasal Tepkiler

Bor diğer mineral elementlerle etkileşime girerek çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri etkiler (Tariq ve Mott, 2007). Bitkilerde B, antioksidan enzim aktivitesini artırır ve böylece abiyotik stresin neden olduğu ROT hasarını hafiflettiğini bildirmişlerdir (Wu ve ark, 2020). Bor sinerjistik ve antagonistik olarak bitkinin beslenmesini etkilemekte ancak yetersiz B veya fazla alımı bor toksisitesine neden olarak bitkilerde strese yol açmaktadır. Toprakta bor borik asit formunda bulunur. Borik asidin

yüksek çözünürlüğü ve hareketliliği nedeniyle, yüksek yağışlarda kolayca süzülerek B eksikliği sorunlarına sebebiyet vermektedir (Brown ve ark., 2002; Riaz ve ark., 2018). Tarım arazilerindeki bu tip sorunları çözmek amaçlı çeşitli gübreleme çalışmaları yapılabilir. Ancak, kontrolsüz veya bilinçsiz bor katkılı gübrelerin uygulanması bor toksisitesine neden olabilmektedir (Reid, 2007; Schnurbusch ve ark., 2010). Ayrıca, dünyanın kurak ve yarı kurak bölgelerindeki tarım topraklarında bor birikimlerinin (toprakta özünde yüksek B içeriğine rağmen) ana nedenlerinden biri, suyun üst topraktan kılcal etki yoluyla buharlaşmasıdır (Wu ve ark., 2019).

Bor toksisitesi etkileri ve tolerans mekanizmaları birçok bitki türünde tanımlanmıştır (Huang ve ark., 2014; Wu ve ark., 2019). Bor toksisitesi semptomları bitki türleri arasında farklılık göstermekle birlikte sıklıkla yaygın bir yaprak hastalığı olan nokta tipi ağ lekesi ile karıştırılır ve özellikle erken aşamalarda semptomlar bitkilerdeki diğer toksik iyonların semptomlarından zar zor ayırt edilir. Ancak, toksisite semptomları tipik olarak yaprak dokusunun uçlarında ve kenarlarında sararma, lekelenme veya kuruma olarak görülür. Bor-hareketsiz türlerde, bu semptomlar daha sonra transpirasyon akımı yoluyla taşınan bor birikimi nedeniyle lateral damarlar arasından orta damara doğru yayılır (Nable ve ark., 1997; Reid ve ark., 2004; Reid, 2007). Genellikle ağsı damarlı dikotilodanlar da yaprak kenarları çevresinde B toksisitesi gözlenirken, paralel damarlı yapraklar ile karakterize edilen buğday ve arpa gibi kültür bitkilerimde toksik etki, damarların sonlandığı yaprak uçlarında siyah lekeler olarak belirir (Roessner ve ark., 2006). Bu nedenle, farklı ürünlerde B toksisitesini değerlendirmek için yaprak yanığı ve nekroz yaygın olarak kullanılmıştır (Sutton ve ark., 2007).

Bor toksisitesi, şeker molekülleri, glikoproteinler, glikolipidler ve RNA, ATP ve NADPH gibi riboz içeren bileşikler de dahil olmak üzere moleküllerle bağlanarak apoplastik ve simplastik dokularda birikmesi nedeniyle hücre bölünmesi, fotosentez ve stoma iletkenliği gibi önemli süreçleri engellediği belirlenmiştir(Reid ve ark., 2004;Landi ve ark., 2012). Yetersiz ve toksik B, kloroplastların bozulmasına neden olarak bitkilerde fotosentez yoluyla gelen ışığı işleme yeteneğini kaybederek oksidatif hasara karşı daha duyarlı hale gelmelerine neden olmaktadır (Landi ve ark., 2019). Yetersiz B, PSII fotoinhibisyonu, elektron taşınmasında ışık enerjisinin kullanımının azalmasına ve aşırı ışık enerjisinin birikiminin artmasıyla ROT üretiminde artış olduğunu bildirmişlerdir (Han ve ark., 2009).

Yetersiz B koşullarında bitkinin kök büyümesi, hormon sentezi, şekerlerin taşınması, protein metabolizması, amino asit sentezi, karbonhidrat metabolizması, RNA sentezi, polen tüpü oluşumu, nükleotit sentezi ve fenol metabolizmasını etkilemektedir (Uluisik ve ark., 2018). Ayrıca yetersiz B membran bütünlüğünü, plazmodesmata kanallarını, enzimleri, çiçek ve meyve gelişimini, iyon akışını ve membran potansiyelini engellemektedir (Camacho-Cristóbal ve ark., 2018). Yetersiz B koşulları bitkinin büyümesine, olgunlaşmasına, gelişmesine, fizyolojik, morfolojik ve biyokimyasal farklılıklara neden olmaktadır (Camacho-Cristóbal ve ark. 2018).

Yetersiz B, fotosentez ürünlerinin taşınmasında azalmaya sebep olduğu için bitki yapraklarında aşırı miktarda çözünür şeker birikimi gözlemlenmiştir (Camacho-Cristóbal ve ark., 2004). Bu, oksitlenebilen ve oksijen radikalleri de ROT üretimini şiddetlendirebilen fenolik bileşiklerin ve kinonlar gibi diğer türevlerin konsantrasyonunun artmasını etkileyebilir (Han ve ark., 2008). Bor toksisitesi, ROT birikimine ve hücre ölümüne nedeniyle lipid peroksidasyonuna yol açarak oksidatif stresi artırır (Gunes ve ark., 2006).

Yetersiz B koşulları, ksilem duvarlarında lignifikasyonun azalmasına bağlı olarak lignin sentezini ve pektin birikimini bozarak hücre duvarının incelmeye neden olur. Bu koşullar hücrelerde ksilem hidrolik iletkenliğinde hasarlanmalar, floem hücrelerindeki genişlemelere, kütikülün yapısal modifikasyonuna, düzensiz hücre şekline, bozulmuş kök suyu alımına, stoma performansına ve fotosenteze etki ettiğini bildirmişlerdir (Wimmer ve Eichert, 2013)

Yetersiz B, bitkilerde polen canlılığı, yaşlanma, polen kısırlığı, tomurcuk dökülmesi, erken çiçeklenme, meyve dökülmesi, çiçek üretiminin engellenmesi ve üremeye ilgili süreçlerde önemli rolleri olduğunu göstermektedir (Marschner ve Rengel, 2012; Hegazi ve ark., 2018). Bitkilerde yetersiz B, tarımsal ürünlerin çoğunda bitkinin tane tutumunda azalmalar meydana geldiğini belirlemişlerdir (Lordkaew ve ark., 2013).

Besin elementi eksiklikleri genellikle bitki dokusundaki fenol seviyelerini artırarak ya da moleküllerin yeni senteziyle sonuçlanan metabolik yolları etkilemektedir. Borik asit sitoplazmada yeterince mevcut olduğunda yapılarında cis-dihidroksil konfigürasyonuna sahip fenolik asitlerle cis dihidroksil-borat kompleksleri oluşturur. Yetersiz B durumunda, cis-dihidroksil-borat komplekslerinin oluşumunun azalması

nedeniyle bu bileşikler serbest formlarda biriktirmektedir (Liakopoulos ve Karabourniotis 2005).

Hamurcu ve ark. (2006b), bezelye bitkisine, kontrollü sera koşullarda farklı seviyelerde B (0, 1, 20 mg kg⁻¹ B) ve Fe (0, 6, 60 mg kg⁻¹ Fe) dozları uygulamıştır. Bor toksisitesinden kaynaklanan kuru madde miktarının uygulanan B dozlarının ortalaması dikkate alındığında B uygulanmayan saksılara göre azaldığı, 1 mg kg⁻¹ B uygulamasında ise artış olduğu belirlenmiştir. Bezelye bitkisine uygulanan B miktarındaki artışla birlikte, bitki boyunda da artışlar gözlemlenmiştir. Bitkiye uygulanan B miktarı arttıkça içsel B konsantrasyonunun arttığı belirlenmiştir.

Hamurcu ve ark. (2006a), kontrollü sera koşullarında farklı seviyelerde uygulanan B ve Fe dozlarının makarnalık buğdayın kuru madde miktarı, B konsantrasyonu ve miktarı, Fe konsantrasyonu ve miktarı, Zn, Cu, Mn konsantrasyonları üzerine etkisini belirlemek amacıyla yaptıkları çalışmada B'ü yedi (0, 0,5, 1, 2, 4, 8 ve 16 mg kg⁻¹), Fe'i ise dört (0, 6, 12, 24 mg kg⁻¹) farklı seviyede uygulamışlardır. Bitkide uygulanan B miktarı arttıkça; B konsantrasyonunun arttığı, Fe miktarı arttıkça; Fe konsantrasyonunun belli bir noktaya kadar artış gösterdiği, belli bir seviyeden sonra daha fazla artmadığını belirlemişlerdir. Fe uygulamasında Fe miktarının artışına bağlı olarak bitkinin B alınımını azalttığını belirlemişlerdir.

Esim ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada mısır fidelerine uyguladıkları B dozları (2 mM ve 4 mM B) sonucunda POX aktivitesinin azaldığını belirlemişlerdir. Bu sonuca bağlı olarak B toksisitesi altında mısır bitkilerinde oksidatif stres meydana geldiği bildirilmiştir.

Hamurcu ve ark (2013), sera koşullarında soya fasulyesine üç farklı bor dozları (0,2, 2 ve 12 mg B kg⁻¹) uygulamaları sonucunda SOD, CAT ve APX enzim aktiviteleri 12 mg B kg⁻¹ altındaki yapraklarda artarken, GR aktiviteleri azalmıştır. SOD ve GR aktiviteleri 2 mg B kg⁻¹ konsantrasyonunda azalırken, POX aktivitesi artmıştır. MDA içeriği 2 mg B kg⁻¹ altında artarken, 12 mg B kg⁻¹ altında azalma göstermiştir. Yapraklardaki bor konsantrasyonu 43 ila 522 mg kg⁻¹ arasında artan B seviyeleri ile önemli ölçüde artarken ve sürgün kuru maddesi 12 mg B kg⁻¹'de azalmalar olduğunu belirlemişlerdir.

AsA/GSH döngüsü, hücrelerdeki ROT detoksifikasyon yollarına karşı önemli bir rol oynar, ancak bu döngünün aktivitesi üzerinde yetersiz B durumunda etkili olduğunu ve bitki hücresinde duyarlı enzimleri düzenlediklerini belirlemişlerdir (Camacho-Cristóbal ve ark., 2015). Bor beslenmesi bitkilerde fotosentezi doğrudan etkilerken, yetersiz B bitkilerde klorofil seviyelerinde azalma, CO₂ asimilasyonunun azalması, terleme hızı ve stoma iletkenliğindeki değişikliklerden etkilenecek fotosentezi bozabilmektedir (Lu ve ark., 2014).

Hamurcu ve ark. (2015), karpuz bitkilerinin kuraklığa toleransını belirlemek için yaptıkları çalışmada, uyguladıkları B dozları (0.05, 0.25 ve 1.25 mM B) sonucunda, PEG 6000'in sebep olduğu kuraklık stres sonucunda 0.05 mM B uygulamasında H₂O₂ birikiminde artışlar olduğunu bildirmişlerdir.

Hamurcu ve ark. (2016a), yaptıkları çalışmada B toksisitesine karşı oldukça yüksek tolerans seviyesine sahip olan *Puccinellia distans* bitkisinin yapraklarında H₂O₂ konsantrasyonları, kontrole kıyasla (0.033 mg L⁻¹ B), yetersiz B (0 mM B) durumunda hem de 25 mg L⁻¹ B konsantrasyonlarında, önemli ölçüde artmıştır. Yetersiz ve toksik B (250 mg mL B⁻¹) varlığında, ·OH-1 radikal süpürücü aktivitesinin arttığını bildirmişlerdir.

Hamurcu ve ark. (2016b), B toksisitesine toleranslı (RX 770) ve hassas (TTM 81.19) mısır çeşitlerine 1/5 oranında seyreltilmiş Hoagland çözeltisi ile kontrol, 2.5, 25, 50 ve 100 mg L⁻¹ B uygulayarak kök ve gövde anatomisindeki etkileri belirlemek amacıyla yürüttükleri çalışmada, bitkide gövde ve kök B konsantrasyonları artan B dozlarına bağlı olarak artış gösterdiği saptanmıştır. Mısır çeşitleri kendi aralarında değerlendirildiğinde, artışların toleranslı RX 770 çeşidinde TTM 81.19 çeşidinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda kontrole göre B uygulamalarında her iki mısır çeşidinde de kök metaksilem, gövde trake ve korteks çaplarının önemli düzeylerde azaldığı, bu azalmaların B toksitesine toleranslı RX 770 çeşidinde, hassas TTM 81.19 çeşidine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Naeem ve ark. (2018), sera koşullarında Dekalb-6525 (kuraklığa dayanıklı) ve Yousafwala (kuraklığa hassas) mısır genotiplerinin yapraklarına artan B dozları (0, 2, 4 ve 6 mg L⁻¹ B) uygulanarak bitkide meydana getirdiği fizyolojik ve biyokimyasal değişimleri incelenmiştir. Kurak koşullar bitkinin su durumu, fotosentetik kapasitesi,

membran geçirgenliğini, antioksidan savunma sistemi ve doku B konsantrasyonunu düşürerek bitkilerin büyümesinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Ancak kurak koşullarda 4 mg L⁻¹ B uygulamasında bitkini su durumunda, prolin birikiminde, toplam serbest amino asitlerde, toplam çözünür şekerlerde ve MDA içeriklerinde azalırken, fotosentetik kapasiteyi, doku B konsantrasyonunu iyileştirerek ve antioksidan savunma sistemini düzenleyerek mısır büyümesini önemli ölçüde iyileştirdiğini bildirmişlerdir.

Shehzad ve ark. (2018), tarla koşullarında ayçiçek bitkisinin yapraklarına B dozları (0, 15, 30, 45 mg/l) uygulanarak kuraklık üzerine etkileri incelenmiştir. Yapraktan (30 mg/l) B uygulaması çiçeklerin çimlenmesinden olgunluk aşamalarına kadar olan stresle ilişkili olumsuzlukları hafifletmiştir. Ayrıca bitkilerin yaprak ve tohum dokularında N, B ve klorofil a ve b pigmentlerinin seviyelerinde iyileşmeler olduğunu belirlemişlerdir. Kuraklık stresinde prolin içeriğinde önemli miktarlarda artış gösterdiğini bildirmişlerdir.

Hamurcu ve ark. (2020), tarafından su kültürü ortamında iki farklı hibrit mısır çeşidine (bor toleranslı RX 770 ve bor duyarlı TTM 8119) farklı B dozlarının (0, 2.5. 25 ve 50 ppm B) bitkinin gelişimi üzerine etkilerinin incelendiği araştırmada B dozlarına bağlı olarak SOD, APX, POX ve GR enzimlerinin aktivitesinin mısır çeşidi RX 770'e B toksisitesine karşı direnç gösterdiğini belirlemişlerdir.

Yetersiz B olan bitkilerin gövdeleri ve saplarında korteks bölgesine yakın boylamsal ve enine bölünmeler nedeniyle ince yapıdadır (Eraslan ve ark., 2007). Tahıl bitkilerinde B'nin noksanlık belirtileri çok nadirdir, çünkü normal başaklar oluşturabildiği gibi çarpık çiçekler de oluşturabilir ve tohumlar da bir dereceye kadar etkilenebilir (Fakir ve ark., 2016).

Yetersiz B koşullarında yetiştirilen kabak bitkisine B verildikten sonra kabak fidelerinden oluşmuştur. Ayrıca, yetersiz B fidelerin üreme organlarında değişiklik gösterdiğini, meyve vermeyi ve çiçeklenmeyi etkilediğini, ayrıca büzüşmüş anterler ve yırtılmış polen tüpleri ve çiçek tomurcukları olduğunu da öne sürmüşlerdir (Zhou ve ark., 2014).

Gunes ve ark. (2004), tarafından sera koşullarında sekiz farklı mısır çeşidine (Furio, Riogrande, Sele, DK 743, Helix, Missouri, Betor ve Poker) farklı B dozlarında (0, 10 ve 30 ppm B) H₃BO₃ uygulanan bitkinin gelişimi üzerine etkilerinin incelendiği

araştırmada bitkinin gövde yaş ağırlık değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Bununla birlikte mısır eşitlerinin B uygulamalarına bağlı olarak yaş ve kuru ağırlıklarında meydana gelen azalmalar arasında da önemli genetik farklılıklar olduğunu belirlemişlerdir.

Yetersiz ve toksik B koşullarında (B stresi) bitkilerin fotoasimilatlarındaki karbon bölünmesini etkilemekte ve yapraklardaki fotoasimilat sentezinin azalmasına neden olarak iletim dokusunda (reme, kök ve diğer gelişen kısımlar) taşınmasını etkiler. B stres koşulları altında, fotoasimilatların karbon bölünmesinin birçok bitki türünde önemli ölçüde etkilendiği belirlenmiştir (Brdar-Jokanović, 2020; García-Sánchez ve ark., 2020; Li ve ark., 2017; Mousavi ve Motesharezadeh, 2019). Yapraklardaki B içeriği ile toksisite semptomlarının şiddeti arasında doğrudan bir ilişki olduğu bilinmektedir. Hassas ve toleranslı türlerin yaprak B konsantrasyonlarının 10 kata kadar değiştiği bildirilmiştir (Furlani ve ark., 2003).

Landi ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada, bor toksisitesine maruz bırakılan kabakgillerde (*Cucumis sativus* L. ve *Cucurbita pepo* L.) fotosistem II'deki fotokimyasal yapıların aşağı regülasyonu ile birlikte Chl a/b oranının azalmasına neden olduğunu bildirilmiştir.

Birçok bitki türünde, bor noksanlığına bağlı olarak Fv/Fm oranını (maksimum klorofil floresansı kuantum verimi) nemli ölçüde azalttığı; bu durum ROT oluşumuna yol açabilecek bir durum olan yaprakların fotoinhibisyonuna sebep olduğunu göstermiştir (Velez-Ramirez ve ark., 2011). Bitkide bu nedenle klorofil içeriğindeki azalmalar olduğunu bildirmişlerdir (Princi ve ark., 2016). Ayrıca, elektron taşıma hızındaki inhibisyon, CO₂ asimilasyonunda yer alan bazı enzimlerin (karboksilaz/oksijenaz, ribuloz-1,5 bifosfat ve fruktoz-1,6-bifosfat fosfataz) aktivitelerinde bir azalmayla birlikte NADPH ve ATP kullanımında dolaylı yoldan etkileyerek azalttığını göstermiştir (Han ve ark., 2009).

Abiyotik stres genel olarak lipid hasarlanmasına bağlı olarak hücresel homoestazın bozulmasına ve dolayısıyla hidroksil radikalleri, süperoksit radikalleri ve hidrojen peroksit gibi radikallerin oluşumuyla proteinleri ve nükleik asitlerin yapılarındaki işleyişi bozmaktadır. Daha nceki bir çalışmada bor fazlalığına bağlı olarak arpa bitkisinde ROT oluşumuna neden olduğu bidirmişlerdir (Karabal ve ark., 2003).

Olumsuz çevre şartlarına bağlı olarak reaktif oksijen türlerinin (ROS) bitki hücrelerinde artışı güncel birçok çalışmayla bildirilmiştir (Wu ve ark., 2020; Kamran ve ark., 2021). Ayrıca buna karşın, bitki savunmasında aktif rollere sahip olan antioksidan savunma sistemleri, Oksidatif hasarlanmaya karşı bitkileri koruduğu bilinmektedir (Imran ve ark., 2020; Saleem ve ark., 2020; Riaz ve ark., 2021).

Askorbat ve glutatyon (enzimatik olmayan antioksidan aktivite) gibi antioksidan moleküller ve askorbat peroksidaz, katalaz ve süperoksit dismutaz gibi enzimler serbest radikallere karşı önemli bir savunma mekanizması olarak kabul edildi (Sharma ve ark., 2012; Hossain ve ark., 2015).

2.4. Tuz ve Bor Stresinin Bitkiler Üzerindeki Etkileri

Tuzluluk stresi, küresel olarak, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerdeki mahsulleri etkileyen başlıca abiyotik streslerden biridir (Parida ve Das, 2005 , Ahmad ve ark., 2023). Sulanan arazilerin yaklaşık %20'si ve toplam arazinin %6'sı tuzlanmadan etkilenirken %70 oranında ürünlerin veriminde azalmalara neden olmaktadır (El-Badri ve ark., 2021).

Toprak tuzluluğu , buharlaşma, yıkama ve sulama uygulamaları gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak toprakta tuz birikmesinden kaynaklanır. Tuzluluk stresi, su ve besin alımını bozarak ,ozmotik dengeyi değiştirerek ve bitki hücre dokularına zarar vererek bitki büyümesine ve gelişimini engeller (Ma ve ark, 2020). Bor stresi, dünya çapında, özellikle bitki büyümesi ve gelişimi açısından tuz stresi kadar önemli bir sorunla karşımıza çıkmaktadır. Bor , bitkilerde eksikliği ve toksisitesi son derece dar bir aralıkla tanımlanan mikro besinlerden biridir (Hamurcu ve ark., 2022).Tuz ve B stresi eş zamanlı oluşması, yarı kurak ve kurak bölgelerde yaygın bir olgudur; yüksek toprak tuzluluğu konsantrasyonları genellikle sınırlı sızıntıya neden olur ve B'u sodyum tuzları şeklinde biriktirmektedir (Juan ve ark., 2024)

Tuzdan arındırılmış suyun kullanımı sıklıkla değişen seviyelerde B içerir ve topraktaki B seviyelerinin artmasına neden olarak bitkilerde B toksisitesine meydana getirmektedir (Hilal ve ark., 2011). B toksisite semptomları, aşırı B'nin hücre bölünmesi ve farklılaşması, protein sentezi ve membran stabilitesi dahil olmak üzere çeşitli fizyolojik süreçlere müdahale etmesinden kaynaklanır (Juan ve ark., 2024). B toksisitesi, bitki içindeki su ve besin maddelerinin taşınmasını bozabilir ve stres etkeninin olumsuz

etkilerini daha da şiddetlendirebilir (Wimmer ve Eichert, 2013).

Juan ve ark. (2024), tuzluluk uygulanan bitkilerde yüksek seviyede Na + olduğunu belirlemişlerdir. Bitkide Na + hareketi K + ile yakından ilişkisinden dolayı kontrole göre K + içeriği tuz stresinde azalmaktadır. Yetersiz B, kontrole bitkilerin yapraklarındaki K + içeriğini azaltırken, B toksisitesinde K +u etkilemediğini bildirmişlerdir (Wang ve Wu, 2013).

Bitkilerde Ca tüm tuzluluk uygulamalarında seviyelerinin azaldığı kökten ksileme doğru hareketini ve ardından bitkinin yapraklar gibi üst kısımlarına taşınmasını engellediğini bildirmişlerdir (Mohamed ve ark., 2016). Bitkilerdeki Ca içeriği, tuzluluğun B birikimi üzerindeki etkisinde önemli bir rol oynadığı iyi bilinmektedir. Kalsiyum, hücre zarlarının bütünlüğünün korunmasına yardımcı olur (Cramer,2006).Tuz stresi, membranlardaki K/Na dengesinin dağılımını bozar ve bitki tarafından alımını azaltarak bitkilerde Ca eksikliğine neden olduğu belirlemişlerdir.Ayrıca bor toksisitesi,bitkilerde Ca konsantrasyonundaki azalmayı daha fazla artırırken ve yetersiz B durumunda Ca alımını arttırıcı, Na ve Mg alımını engellediğini bildirmişlerdir (Syvertsen ve Garcia-Sanchez, 2014).

Lata ve ark. (2017), hidroponik bir sistemde bor dozları (5 mM B ile 10 mM B) ve tuzluluk (60 mM ve 100 mM NaCl) üç buğday çeşidi üzerindeki etkileri incelendiğinde B ve tuz konsantrasyonunun artmasıyla gövde yaş ağırlığında azalmalar meydana geldiği belirlenmiştir.

Hamurcu ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada P. distans.'ın B ve NaCl (0uM, 30uM, 4mM 8mM B ve 0, 100, 250 mM NaCl) stres koşullarında elde edilen sonuçlarına göre OH⁻ ve H₂O₂ radikallerinde bitki gelişiminde gerilemeye sebep olan çok yüksek konsantrasyonlardaki B dozları (4 mM B ve 8 mM B) ile B uygulamasının yapılmadığı (0 mM B) dozlarda belirgin fark olduğunu, tuzlu koşullarda B uygulanması sonucunda benzerlik gösterdiği ve OH⁻ ve H₂O₂ radikallerinin artış gösterdiğini bildirmişlerdir.

Bildiren (2019), iki farklı buğday genotipine (Momtchil ve Pamukova-97) tuz (150 mM NaCl), bor (30 µM H₃BO₃) ve tuz × bor (150 Mm NaCl +30 µM H₃BO₃) uygulamalarının fizyolojik ve biyokimyasal değişimleri üzerine etkisinde bor uygulamalarında Momtchil buğday genotipinin prolin içeriğinde artışlar olduğunu bildirmişlerdir.

Alharby ve ark. (2021), sera koşullarında soya bitkisine (*Glycine max* L.) tuz dozları (75 ve 150 mM NaCl) ve 1mM B uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında kontrole göre EC değerleri sırasıyla %107 ve %131 oranında büyük bir artış göstermiştir. Tuz uygulaması ile tuzxbor interaksyonu karşılaştırıldığında soya bitkisinin tuz stresine göre EC değerleri sırasıyla %24 ve %22 oranlarında azaltıldığını belirlemiştir

Khan ve ark. (2021), hidroponik ortamda 19 *Aegilops* buğday çeşitlerine bor dozları (3,1µM B, 1 mM B, 10 mM B) uygulandı ve bu dozların MDA, prolin, kök ve sürgün büyümesi üzerine etkileri incelenmiştir. Buğday çeşitleri B toksisitesinde, MDA ve prolin içeriklerine göre büyüme parametreleri üzerinde daha belirleyici bir etki göstermiştir. *Aegilops biuncialis* örnek TGB 026219 ve *Aegilops columnaris* örnek TGB 000107, B toksisite karşı stres toleransına sahip çeşitler olduğu belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Bitki Materyali

Tez çalışmasında kullanılan mısır genotipleri Mısır Araştırma Enstitüsünden (MAE) elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. Materyal olarak kullanılan mısır genotipleri

MAE-1	MAE-13	MAE-25	MAE-37	MAE-49	MAE-61	MAE-73	MAE-85	MAE-97	MAE-109
MAE-2	MAE-14	MAE-26	MAE-38	MAE-50	MAE-62	MAE-74	MAE-86	MAE-98	MAE-110
MAE-3	MAE-15	MAE-27	MAE-39	MAE-51	MAE-63	MAE-75	MAE-87	MAE-99	MAE-111
MAE-4	MAE-16	MAE-28	MAE-40	MAE-52	MAE-64	MAE-76	MAE-88	MAE-100	MAE-112
MAE-5	MAE-17	MAE-29	MAE-41	MAE-53	MAE-65	MAE-77	MAE-89	MAE-101	MAE-113
MAE-6	MAE-18	MAE-30	MAE-42	MAE-54	MAE-66	MAE-78	MAE-90	MAE-102	MAE-114
MAE-7	MAE-19	MAE-31	MAE-43	MAE-55	MAE-67	MAE-79	MAE-91	MAE-103	MAE-115
MAE-8	MAE-20	MAE-32	MAE-44	MAE-56	MAE-68	MAE-80	MAE-92	MAE-104	MAE-116
MAE-9	MAE-21	MAE-33	MAE-45	MAE-57	MAE-69	MAE-81	MAE-93	MAE-105	MAE-117
MAE-10	MAE-22	MAE-34	MAE-46	MAE-58	MAE-70	MAE-82	MAE-94	MAE-106	MAE-118
MAE-11	MAE-23	MAE-35	MAE-47	MAE-59	MAE-71	MAE-83	MAE-95	MAE-107	MAE-119
MAE-12	MAE-24	MAE-36	MAE-48	MAE-60	MAE-72	MAE-84	MAE-96	MAE-108	MAE-120

3.2. Metot

Tez çalışmamızda kullandığımız mısır genotipleri kontrollü koşullarda su kültürü ortamında Hoagland (1950) çözeltisi ile yetiştirilmiştir. Su kültürü ortamında; bitkilerin tohum çimlenmesi ve çimlenme sonrası genç fidelikleri, büyüme ve gelişme süresince % 45-55 nem, 16 saat aydınlık ve 8 saat karanlık fotoperiyod, 22±1 °C sıcaklık ile 16 000 Lüks/Gün ışık intensitesi olacak şekilde ayarlanan kontrollü koşullar altında Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü bünyesinde bulunan Su Kültürü Laboratuvarı'nda yetiştirilmiştir (Resim 3.1).



Resim 3. 1 . Araştırmanın yapıldığı tam kontrollü su kültürü kabini ve laboratuvar

3.2.1. Tohum Ekimi

Denemelerde kullanılan mısır genotiplerine ait tohumlar önce %1'lik sodyum hipoklorit ve %75 etanol ile muamele edildikten sonra steril olan saf suyla yıkanarak yüzey sterilizasyonu tamamlanmıştır. Steril edilen tohumlar ortalama 4-5 saat saf suda bekletildi. Üç gün boyunca karanlıkta 22°C'de çimlendirilen mısır genotipleri su kültürü kabine alınarak 1/2 oranında Hoagland besin solüsyonuyla yetiştirildi. Besin solüsyonları her iki günde bir yenisiyle değiştirildi ve bitkiler üç yapraklı evreye geldikten sonra uygulamalara başlandı.

3.2.2. Tarama Denemeleri

Tarama denememizde mısır genotiplerinde stres koşulları oluşturmak amacıyla bitkiler üç yapraklı evreye geldiklerinde bor ve tuz stresi koşullarında 120 adet mısır genotipinde tarama denemesi kurulmuştur. Tarama denemesi tesadüf parselleri deneme desenine göre 120 adet mısır genotibine aşağıda verilen 3 uygulama B1 (Kontrol ,0.0033 mM B) , B3 (Toksik B , 4 mM B) ve T+B1 (150 mM NaCl + 0.0033 mM B) yapılarak 3 tekerrürlü olacak şekilde gruplar halinde toplam 720 adet saksıda 10'ar gün boyunca yürütülmüştür.

Araştırmada 720 saksıda (3 uygulama konusu x 3 tekerrür x 120 mısır genotipi) çalışmalarımız su kültürü ortamında yürütülmüştür (Resim 3.2). Tarama sonucunda temel büyüme parametreleri (kök ile gövde boyu, taze ve kuru ağırlıklar), ölçümleri dikkate alınarak tartılı derecelendirme yöntemine göre tuz, yetersiz B ve toksik B koşullarında hassas ve toleranslı olan 2 farklı (MAE 103, MAE 45) mısır genotipi seçilmiştir. Tarama sonucunda belirlenen mısır genotipleri ile ana deneme kurulmuştur.

- bor toksitesine toleranslı ve tuza dayanıklı mısır genotipi MAE 103
- bor toksitesine toleranssız ve tuza dayanıksız mısır genotipi MAE 45



3.2.3. Ana Denemenin Kurulması

Tarama denemelerinde bor ve tuz uygulamaları sonucunda tespit edilen 2 farklı (MAE 103, MAE 45) mısır genotipi ile ana deneme kurulup yürütülmüştür.

Ana denemede aşağıda verilen 8 uygulama konusu ve 4 tekerrürlü olarak 64 saksıda (8 uygulama konusu x 4 tekerrür x 2 mısır genotipi) yürütülmüştür. Araştırmada mısır genotiplerine bor ve tuz stresi aşağıda belirtildiği şekilde uygulama yapıldı ve uygulama kodları aşağıda verilmiştir.

1. **B1**= Kontrol (0.0033 mM B)
2. **B0**= Yetersiz B (0 mM B)
3. **B2**= Yeterli B (0.5 mM B)
4. **B3**= Toksik B (4 mM B)
5. **T+B1** = (150 mM NaCl + 0.0033 mM B)
6. **T+B0**= (150 mM NaCl + 0 mM B)
7. **T+B2**= (150 mM NaCl + 0.5 mM B)
8. **T+B3**= (150 mM NaCl + 4 mM B)

Çalışmada bor, kontrol yani yeterli seviyede B Hoagland çözeltisi içinde bulunan H₃BO₃ (% 28.97 B)'den gelen 0.0033 mM B içermektedir. 0 mM B, Hoagland solüsyonu hazırlanırken B kaynağı olarak kullanılan H₃BO₃ kullanılmadığı için 0 mM B olarak değerlendirilmiştir. Hoagland solüsyonu hazırlanırken B kaynağı olarak kullanılan 10 mM B H₃BO₃ kullanılarak 0.5 mM B ve 4 mM B uygulanmıştır. Hoagland (1950) besin solüsyonu her iki günde bir değiştirilmiştir.

3.2.4. Bitki Örnekleme

Bitkiler stres uygulamalar başladıktan sonra morfolojik ve fizyolojik değişimleri incelenerek örnekleme 10. günde yapılmıştır. Örnekleme her bir saksıdan alınan bitki örneklerinde RWC ve EC ölçümleri alındı. Mısır genotiplerinde büyüme parametreleri (kök ve gövde boy, kök ve gövde yaş ve kuru ağırlıkları) belirlendi ve bitkilerin yapraklarında enzim analizlerinde kullanılmak üzere -80 °C'de derin dondurucuda saklanmıştır.

3.3. Analiz Yöntemleri

3.3.1. Gövde ve kök örneklerinin boyları, yaş ve kuru ağırlıklarının belirlenmesi

Büyüme parametreleri olarak gövde ve kök örneklerinin boyları, yaş ve kuru ağırlıkları ele alınmıştır. Her bir saksıdan alınan 1'er adet kök ve gövde örneğinin boyları ölçülerek cm cinsinden kaydedilmiştir. Bitki kök ve gövde yaş ağırlıkları tartılmış ve 70 oC de 72 saat etüvde kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

3.3.2. Gövde örneklerinde besin elementi içeriklerinin belirlenmesi

Bitkilerin gövde kısımları tamamen temizleninceye kadar musluk suyu ile yıkandıktan sonra sırasıyla bir kez saf su, 0.2 N HCl çözeltisi, iki kez saf su ve bir kez de deiyonize su ile yıkanıp, kaba filtre kâğıdı üzerinde fazla suları alınmıştır. Daha sonra kese kağıtlarına ayrı ayrı konulan bitki kısımları hava sirkülasyonlu kurutma dolabında 70 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kuruyan bitki örneklerinin ağırlıkları belirlendikten sonra tungsten kaplı bitki öğütme değirmeninde öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Polietilen kavanozlara konulan öğütülmüş bitki örnekleri analizde kullanılmadan önce 70 °C’de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutma dolabında bırakılmıştır.

Kurutulan ve öğütülen bitki örneklerinden 0.2 g tartılarak 5 ml HNO₃ ile yüksek sıcaklık (210 °C) ve yüksek basınç (200 PSI) altında mikrodalga cihazında (CEM Mars 5) çözündürülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra örnekler 25 ml’ lik balonjojeye aktarılarak soğutulmuş, deiyonize su ile derecesine tamamlanmıştır. Bu süzükler hemen ince gözenekli filtre kâğıdı ile süzülerek 25 ml’lik polietilen şişelere aktarılmış ve süzükte B ve Se içerikleri Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Toprak Gübre ve Bitki Besleme Araştırma Laboratuvarında bulunan ICP-OES (Agilent-5100, Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer) cihazı ile okunmuş ve ppm cinsinden hesaplanmıştır.

3.3.3. Bağıl su içeriği (RWC)

Her bir saksıdaki bir adet bitkiden en genç sürgünlerden sonra gelen lateral yaprakların uç kısımlarından seçilen 1 adet yaprak örneği alınarak yaş ağırlıkları ölçülmüştür. 4 saat boyunca dI-H₂O içinde petri kaplarında bekletilerek numunelerin suyu alarak turgorlu hale geçmesi sağlanmıştır. 70 °C’de 72 saat etüvde kurutulduktan sonra kuru ağırlıklar alınmıştır. Her bir gruba ait yaprak örneklerinin bağıl su içeriği aşağıdaki formüle göre % olarak hesaplanmıştır;

$$\text{Bağıl Su İçeriği (\%)} = [(YA - KA) / (TA - KA)] \times 100$$

YA=Yaş Ağırlık

KA=Kuru Ağırlık

TA=Turgorlu Ağırlık

3.3.4. Prolin içeriğinin belirlenmesi

Serbest prolin içeriğinin belirlenmesi Bates ve ark. (1973)'na göre yapılmıştır. Sıvı fazdan aspire edilen toluen fraksiyonunun 520 nm'deki absorbansı spektrofotometrede okunmuştur. Prolin içeriği, kalibrasyon eğrisi kullanılarak hesaplanmış ve nmol g-1 yaş ağırlık olarak ifade edilmiştir.

3.3.5. Elektrolit Sızıntısının (EC) belirlenmesi

Hücre zarı geçirgenliği yani; elektrolit sızıntısının belirlenmesi Dionisio-Sese ve Tobita (1998)'nin tanımladıkları yöntemle göre yapılmıştır. Bunun için 0.1 g taze yaprak örnekleri 5 mm uzunluğunda kesilerek 10 ml deiyonize su içeren deney tüplerine transfer edilmiştir. Tüpler plastik kapaklarla kapatıldıktan sonra 32 °C'lik su banyosunda 2 saat tutulmuştur. Ortamın elektrik iletkenliği EC metre ile ölçülerek (EC1) örnekler 121°C'de 20 dk boyunca tüm dokuların ölmesi ve elektrolitlerin dışa çıkması için otoklava bırakılmıştır. Sonra örnekler 25 °C'ye kadar soğutularak bu ortamdaki elektrik iletkenlikleri ölçülmüştür (EC2). Elektrolit sızıntısı (EC) aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$EC = EC1/EC2 \times 100$$

3.3.6. Lipid peroksidasyonun belirlenmesi (MDA)

Lipid peroksidasyonunun belirlenmesi TBARS reaksiyonu sonucu oluşan malondialdehit (MDA) miktarının belirlendiği, Madhava Rao ve Sresty (2000) tanımladıkları yöntemle göre yapılmıştır. Aktivite için 532-600 nm aralığında absorbans değişimlerine bakılmıştır.

3.3.7. Reaktif oksijen türlerinin (ROS) belirlenmesi

Reaktif oksijen türleri olarak hidroksil radikali ve hidrojen peroksit içeriği ayrı ayrı ele alınmıştır.

3.3.7.1. Hidroksil radikalının (OH•) belirlenmesi

Analiz için gerekli olan bütün solüsyonlar analiz boyunca taze olarak hazırlanmıştır. Hidroksil radikali (OH•) Chung ve ark., (1997)'ye göre belirlenmiştir. Deoksiriboz ve OH•'in, Fe³⁺/askorbat/EDTA/H₂O₂ sisteminden ürettiği örnek

arasındaki rekabet $\text{OH}\cdot$ süpürülme aktivitesinin belirlenmesi için ölçülmüştür. Reaksiyon karışımı 0.30 ml 20 mM sodyum fosfat tamponu (pH 7.0), 0.15 ml 10 mM 2-deoksiriboz, 0.15 ml 10 mM FeSO_4 , 0.15 ml 10 mM EDTA, 0.15 ml 10 mM H_2O_2 , 0.525 ml H_2O ve 0.075 ml ekstraktı içermektedir. Karışım 37°C 'de 2 saat boyunca inkübe edilmiştir. Ardından 50 mM NaOH içerisinde hazırlanan 750 μl % 2.8 triklor asetik asit ve 0.75 ml % 1.0 TBA, test tüplerine eklenerek 20 dakika boyunca tüpler kaynatılmıştır. Sonrasında karışım soğutulularak 520 nm absorbansta ölçüm yapılmıştır.

3.3.7.2. Hidrojen peroksit (H_2O_2) içeriğinin belirlenmesi

Hidrojen peroksit ölçümü için kullanılacak olan örnekler, hasattan hemen sonra sıvı azotta dondurularak depolanmıştır ve H_2O_2 miktarı Liu ve ark. (2010)'nın tanımladığı metoda göre ölçülmüştür.

3.3.8. Antioksidan enzim aktivitelerinin belirlenmesi

3.3.8.1. Enzim ekstraktlarının hazırlanması

Antioksidan enzimlerin ekstraksiyonu için derin dondurucuda saklanmış olan 1'er g yaprak örneği, soğutulmuş havanda sıvı azotta % 2 w/v polivinilpolipirrolidon (PVPP) ve 1 mM EDTA içeren pH 7.8'de 50 mM Na-fosfat tamponuyla homojenize edilmiştir. Ardından $+4^\circ\text{C}$ 'de, 14 000 rpm'de 30 dakika santrifüj edilmiştir. Santrifüj sonunda elde edilen üst faz, enzim aktivitesi analizlerinde kullanılmıştır. Ekstraksiyon işleminin tamamı $\pm 4^\circ\text{C}$ 'de gerçekleştirilmiştir.

3.3.8.2. Süperoksit dismutaz (SOD) enzim aktivitesinin belirlenmesi

Süperoksit dismutaz (SOD) enzim aktivitesi, Beauchamp ve Fridovich (1971) tarafından tanımlanan metoda göre yapılmıştır. SOD aktivitesi, 560 nm'de spektrofotometrede ölçülen elektron alıcısı olan NBT'nin fotokimyasal indirgenmesinin % 50 engellenmesine neden olan enzim miktarı olarak belirlenmiştir. Spesifik enzim aktivitesi Ünite mg-1 protein olarak belirlenmiştir. 1 ünite SOD aktivitesi, 25°C 'de 1 dakikada 1 μmol substratı ürüne dönüştüren enzim (SOD) miktarını göstermiştir.

3.3.8.3. Peroksidaz (POX) enzim aktivitesinin belirlenmesi

Peroksidaz (POX) enzim aktivitesi, Herzog ve Fahimi (1973) tanımladığı metoda göre yapılmıştır. Köre karşı 465 nm’de H₂O₂ varlığında okside olan DAB (3'-3'-diaminobenzidin tetrahidroklorit) oluşum miktarına bağlı olarak 3 dakika boyunca absorban değişimleri okunmuştur.

3.3.8.4.Katalaz (CAT) enzim aktivitesinin belirlenmesi

Katalaz (CAT) enzim aktivitesi, Bergmeyer (1970) tanımladığı metoda göre yapılmıştır. Analiz UV ışığı bölgesinde köre karşı 240 nm’de H₂O₂’nin azalma oranının belirlenmesi ile yapılmıştır. Reaksiyon boyunca absorbansta oluşan düşüş 180 sn boyunca takip edilmiştir. CAT aktivitesi dakikada harcanan µmol H₂O₂ olarak ifade edilmiştir.

3.3.8.5. Askorbat peroksidaz (APX) enziminin aktivitesinin belirlenmesi

Askorbat peroksidaz (APX) aktivitesinin tayini Nakano ve Asada (1981) göre yapılmıştır. Askorbat okside oldukça, spektrofotometreden 290 nm’deki absorbansta oluşan azalma okunmuş ve hesaplamalar yapılmıştır. Askorbatın oksidasyonu, enzim ekstraktının katılmasıyla başlatılarak, absorbanstaki azalma 180 sn boyunca takip edilmiştir. Bir birim APX aktivitesi dakikada okside olan 1 mmol ml⁻¹ askorbat olarak ifade edilmiştir.

3.3.8.6. Glutasyon redüktaz (GR) enzim aktivitesinin belirlenmesi

Glutasyon redüktaz (GR) aktivitesi, 340 nm’deki absorban azalmasından yola çıkılarak hesaplanmıştır (Foyer ve Halliwell, 1976). NADPH varlığında, okside glutasyon miktarındaki azalma, kuvars küvette köre karşı 180 sn boyunca takip edilmiştir ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Spesifik enzim aktivitesi, dakikada indirgenen 1 mmol ml⁻¹ GSSG miktarı olarak ifade edilmiştir.

3.3.8.7. Glutasyon (GSH) ve okside glutasyon(GSSG) miktarlarının belirlenmesi

Toplam glutasyon (redükte GSH ve okside GSSG) Hawrylak ve Szymanska (2004)’nın metoduna göre sıvı azotta dondurulmuş yaprak örneklerinden ekstrakte edilmiştir. Ekstrakta 412 nm’ de spektrofotometrik okumalar yapılmış ve GSH ve GSSG miktarları hesaplanmıştır.

3.4. Anatomik değişimlerin belirlenmesi

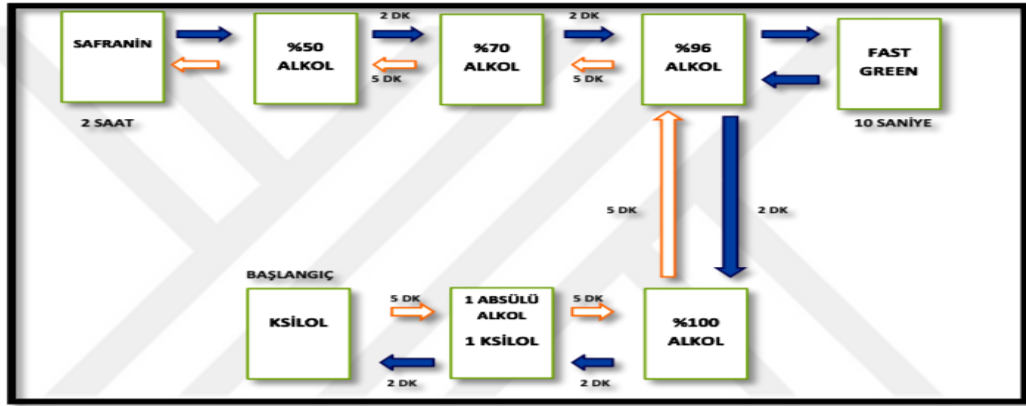
Bitki materyalleri mısır genotiplerinin yaprak örnekleri incelemelerde kullanılmak üzere %70'lik alkolde bekletildi. Misroskopta gözlem yapabilmek için bitkilerin yaprak kısımlarında parafin metodu (Algan, 1981) uygulanarak 5-10 µm kalınlığındaki kesitler mikrotom yardımı ile alınmıştır. Alınan bu kesitler incelenmiş ve Leica DM3000 motorize mikroskop ile fotoğrafları çekilmiştir. Parafin metodu (Resim 3.3) ile alınan kesitler safranin ve fast-green ikili boyama yöntemi ile boyanmıştır. % 96'lık etanolde hazırlanan fast-green ile % 50'lik etanolde hazırlanan safranin boyalarının 9/1 oranında fast-green/safranin şeklinde karıştırılmasıyla meydana gelen yeni bir boyama yöntemi ile boyanmıştır (Bozdağ ve ark., 2016). El kesitiyle alınan örneklerinde Leica DM3000 motorize mikroskop ile fotoğrafları çekilmiştir (Resim 3.2).



Resim 3. 2 . Leica DM3000 motorize mikroskop

Mikrotom kesitleri alabilmek için Parafin metodu uygulanmıştır. Bitki örneklerinin kök ve yaprak kısımlarından alınan küçük parçalar öncelikle % 70'lik alkolde fikse edildikten sonra sırasıyla; % 80'lik alkolde 2 saat 30 dakika, % 90'lık alkolde 1 saat 20 dakika, % 100 alkolde 20 dakika, 1 alkol-1 ksilolde 20 dakika ve ksilolde 20 dakika bekletilmiştir. Ksilolde bekleme süresi tamamlandıktan sonra materyalin bulunduğu kaba boncuk halinde bulunan parafin rendelenerek yavaş yavaş eklenmiştir. Bu işlem 24 saat içinde tamamlandıktan sonra parafine doyurulma işlemi için örnekler 550 °C'deki etüvde bir hafta bekletilmiştir. Ksilol kokusu gidince örneklerin bulunduğu kaba sıvı parafin ilave edilip, blok yapımında kullanılmak üzere, 58 °C' deki etüvde 3-4 gün bırakılmıştır. Daha sonra L şeklindeki metal levhalar yardımıyla bloklar hazırlanmıştır. Bu bloklardan 10-15 mm kalınlığında şeritler halinde kesitler alınmıştır. Kesitlerin parlak yüzeyleri lama gelecek şekilde, kesitler lama yerleştirilmiştir. Ok uçlu

iğnelerin yardımıyla kesitler gerdirilerek kesitlerin lama daha iyi yapışması sağlanmıştır. Kesitlerin süzölmeleri için, lamalar dik duracak şekilde 1 gece bekletilerek boyama işlemine geçilmiştir. Boyama için lam taşıyıcı sepetlere yerleştirilen kesitlerin bulunduğu lamalar sırasıyla ksilol, 1 ksilol/1 absol alkol, absolü alkol, % 96'lık alkol, % 70'lik alkol ve % 50'lik alkol serilerinde 5'er dakika tutulduktan sonra % 50'lik alkolde hazırlanmış olan safranin boyasında 2 saat bekletilmiştir. Safraninde boyama işlemi tamamlandıktan sonra üzerlerinde kesit bulunan lamalar sırasıyla % 50'lik alkol, % 70'lik alkol, % 96'lık alkol serilerinde 2'şer dakika bekletildikten sonra % 96'lık alkolde hazırlanmış olan fast-green boyasında 10 saniye tutulduktan sonra sırasıyla % 96'lık alkol, absolü alkol, 1 ksilol/1 absolü alkol ve ksilol serilerinde 2'şer dakika tutulmuştur (Resim 3.2).



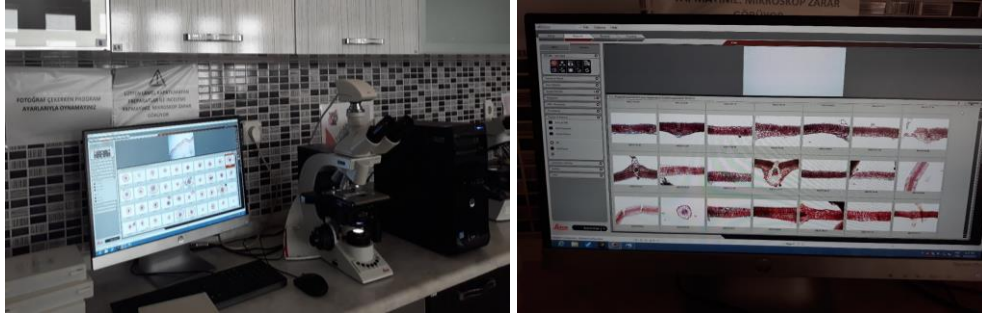
Resim 3. 3 . Parafin metodunda anatomik kesitlerin boyanmasında kullanılan seriler

Ksilolden çıkarılan preparatlar üzerindeki kesitlere 1-1.5 damla entellan damlatılarak lamel kapatılarak hazır preparatlar elde edildi (Resim 3.4).



Resim 3. 4 . Örneklere ait hazır preparatların elde edilmesi

Bu şekilde sürekli preparat haline getirilen örnekler (Resim 3.4) mikroskopta (Leica DM3000) 10x4, 10x10, 10x20 ve 10x40 büyötmeli objektifler kullanılarak incelendi. İncelenen anatomik yapıların fotoğrafları çekildi (Resim 3.5).



Resim 3. 5 . Uygulamalara göre kök ve yaprak kesitlerine ait preparatlar

İncelenen preparatlarda her bir uygulamaya ait kök ve yaprakların doku hücrelerinin ölçüleri Screen Calipers programındaki mikrometrik cetvel ile ölçülerek minimum, maksimum, ortalama ve standart hata değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo haline getirilerek değerlendirilmiştir.

3.5. İstatistiki Analizler

Fizyolojik ve biyokimyasal çalışmalarda elde edilen sayısal veriler kullanılarak istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmelerde MINITAB 20 istatistik paket programı kullanılarak yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Çalışmamız tarama ve ana deneme olmak üzere 2 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Tarama denemesinde 120 adet mısır genotipinde B1 (kontrol 0.0033 mM B), B2 (toksik bor 4 mM) ve T+B1 (tuz, 150 mM NaCl + 0.0033 mM B) stresi koşullarında büyüme parametreleri (gövde ve kök kuru ağırlığı) belirlenmiştir. Bu parametrelerde uygulamaların kontrole göre (B1) yüzde değişimleri hesaplanmıştır. Büyüme parametrelerinde en az değişim olan genotip B toksitesine toleranslı ve tuza dayanıklı (MAE 103) ve en fazla değişim olan genotip ise B toksitesine toleranssız ve tuza dayanıksız genotip (MAE 45) olarak belirlenmiştir. Daha sonra ana deneme belirlenen bu iki genotip üzerinde kurulup yürütülmüştür.

4.1. Tarama Denemesi Sonuçları

Araştırmada kullanılan mısır genotiplerinde tuz ve bor uygulamalarına bağlı olarak tuza ve bora toleranslılık seviyelerine göre belirlenip ana denemede kullanılan genotipler seçilmiştir. Tarama denemesinde 120 mısır genotipine tuz (150 mM NaCl) ve toksik B (4 mM B) stresi uygulaması yapılmış ve gövde-kök kuru ağırlık değerlerindeki % değişim oranlarına göre toleranslılık seviyeleri belirlenmiştir. Tarama denemesinde kullanılan mısır genotiplerine ait gövde ve kök kuru ağırlık değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Uygulamaların mısır genotiplerinin gövde ve kök kuru ağırlıklarının kontrollerine göre değişimleri

	Gövde Kuru Ağırlık (g)					Kök Kuru Ağırlık (g)				
Genotipler	Kontrol	4 mM B	% Değişim	150 mM NaCl	% Değişim	Kontrol	4 mM B	% Değişim	150 mM NaCl	% Değişim
MAE 1	0.97	0.45	-54	0.26	-73	0.24	0.09	-61	0.12	-49
MAE 2	0.39	0.12	-68	0.01	-97	0.16	0.02	-85	0.01	-91
MAE 3	0.60	0.41	-24	0.14	-71	0.24	0.11	-54	0.03	-90
MAE 4	0.80	0.30	-63	0.13	-84	0.20	0.13	-36	0.02	-92
MAE 5	0.81	0.17	-80	0.07	-91	0.21	0.01	-94	0.01	-93
MAE 6	0.50	0.23	-55	0.02	-95	0.13	0.04	-65	0.01	-91
MAE 7	0.26	0.17	-34	0.08	-71	0.23	0.07	-69	0.02	-93
MAE 8	1.04	0.48	-53	0.16	-85	0.29	0.10	-66	0.03	-89
MAE 9	0.68	0.26	-63	0.08	-88	0.25	0.10	-61	0.02	-91
MAE 10	0.58	0.41	-28	0.04	-93	0.25	0.13	-47	0.01	-94

MAE 11	0.62	0.17	-74	0.05	-92	0.23	0.09	-62	0.01	-95
MAE 12	0.32	0.23	-28	0.10	-70	0.20	0.12	-40	0.01	-93
MAE 13	0.72	0.33	-54	0.12	-83	0.17	0.12	-27	0.02	-89
MAE 14	0.61	0.20	-67	0.13	-79	0.32	0.15	-52	0.02	-93
MAE 15	0.64	0.21	-67	0.03	-95	0.28	0.12	-58	0.01	-96
MAE 16	0.21	0.13	-39	0.05	-78	0.35	0.19	-45	0.02	-94
MAE 17	0.75	0.16	-79	0.03	-96	0.32	0.08	-75	0.02	-93
MAE 18	0.71	0.22	-69	0.25	-64	0.24	0.12	-48	0.12	-48
MAE 19	0.31	0.24	-23	0.10	-68	0.27	0.08	-70	0.02	-94
MAE 20	0.37	0.25	-31	0.03	-91	0.19	0.09	-54	0.02	-89
MAE 21	0.66	0.28	-57	0.05	-93	0.33	0.12	-63	0.20	-37
MAE 22	0.57	0.22	-61	0.17	-71	0.27	0.12	-55	0.02	-91
MAE 23	0.95	0.55	-42	0.38	-59	0.34	0.13	-60	0.17	-51
MAE 24	1.12	0.3	-72	0.28	-75	0.26	0.14	-48	0.14	-48
MAE 25	0.61	0.22	-65	0.09	-85	0.22	0.16	-28	0.01	-95
MAE 26	1.40	0.66	-52	0.37	-74	0.27	0.12	-54	0.01	-95
MAE 27	0.64	0.19	-70	0.24	-63	0.26	0.13	-49	0.11	-59
MAE 28	0.82	0.26	-68	0.07	-91	0.22	0.13	-41	0.01	-93
MAE 29	0.78	0.12	-85	0.08	-89	0.31	0.16	-49	0.02	-94
MAE 30	0.91	0.38	-58	0.11	-88	0.24	0.14	-42	0.02	-93
MAE 31	0.92	0.31	-65	0.14	-84	0.28	0.13	-53	0.01	-95
MAE 32	0.43	0.24	-45	0.05	-88	0.32	0.17	-44	0.02	-92
MAE 33	0.88	0.51	-42	0.12	-86	0.23	0.12	-48	0.01	-94
MAE 34	0.11	0.06	-45	0.04	-63	0.22	0.13	-42	0.03	-89
MAE 35	0.44	0.27	-39	0.06	-87	0.35	0.23	-34	0.03	-92
MAE 36	1.02	0.58	-43	0.25	-75	0.28	0.08	-69	0.12	-58
MAE 37	0.80	0.50	-38	0.10	-87	0.39	0.19	-50	0.02	-95
MAE 38	0.63	0.43	-32	0.09	-86	0.18	0.12	-36	0.01	-93
MAE 39	1.09	0.60	-46	0.30	-71	0.23	0.12	-45	0.07	-67
MAE 40	1.33	0.56	-58	0.21	-84	0.31	0.19	-40	0.04	-88
MAE 41	0.96	0.65	-32	0.02	-98	0.36	0.15	-58	0.02	-95
MAE 42	0.54	0.48	-11	0.12	-78	0.32	0.14	-55	0.12	-62
MAE 43	0.82	0.63	-23	0.31	-63	0.32	0.16	-51	0.10	-69
MAE 44	0.72	0.40	-44	0.03	-95	0.28	0.15	-44	0.01	-95
MAE 45	0.30	0.07	-77	0.02	-91	0.26	0.03	-88	0.01	-95
MAE 46	0.73	0.34	-54	0.08	-89	0.26	0.03	-88	0.03	-88
MAE 47	0.72	0.46	-37	0.22	-70	0.38	0.13	-66	0.14	-64
MAE 48	0.54	0.44	-20	0.15	-73	0.34	0.13	-61	0.02	-94
MAE 49	0.59	0.16	-72	0.04	-92	0.28	0.06	-77	0.02	-92
MAE 50	0.18	0.04	-76	0.02	-91	0.26	0.13	-49	0.02	-92
MAE 51	0.61	0.29	-52	0.03	-95	0.42	0.11	-73	0.02	-94
MAE 52	0.86	0.26	-70	0.16	-81	0.34	0.12	-64	0.08	-76
MAE 53	1.06	0.46	-57	0.10	-91	0.37	0.23	-37	0.01	-97

MAE 54	1.08	0.46	-57	0.16	-85	0.34	0.22	-35	0.01	-96
MAE 55	0.80	0.48	-40	0.08	-90	0.32	0.15	-49	0.02	-92
MAE 56	0.63	0.23	-64	0.03	-96	0.28	0.09	-67	0.01	-97
MAE 57	0.34	0.18	-47	0.02	-95	0.31	0.12	-62	0.02	-93
MAE 58	0.97	0.34	-64	0.03	-97	0.30	0.11	-65	0.01	-96
MAE 59	0.42	0.17	-59	0.02	-95	0.26	0.11	-58	0.01	-95
MAE 60	1.10	0.61	-44	0.33	-70	0.26	0.06	-76	0.04	-84
MAE 61	0.89	0.13	-86	0.02	-98	0.33	0.10	-69	0.02	-95
MAE 62	0.85	0.40	-52	0.28	-67	0.23	0.12	-48	0.10	-57
MAE 63	0.66	0.18	-73	0.03	-95	0.25	0.03	-88	0.01	-95
MAE 64	0.66	0.15	-76	0.02	-96	0.29	0.02	-93	0.01	-95
MAE 65	1.12	0.33	-69	0.20	-82	0.23	0.07	-69	0.02	-92
MAE 66	0.58	0.16	-72	0.05	-91	0.35	0.12	-65	0.03	-90
MAE 67	0.47	0.16	-66	0.06	-87	0.38	0.13	-66	0.02	-94
MAE 68	0.46	0.13	-71	0.09	-81	0.38	0.12	-66	0.01	-96
MAE 69	0.89	0.22	-75	0.05	-94	0.36	0.13	-64	0.02	-94
MAE 70	0.43	0.13	-70	0.07	-84	0.19	0.14	-26	0.02	-89
MAE 71	0.93	0.41	-57	0.07	-92	0.31	0.14	-54	0.02	-94
MAE 72	0.74	0.33	-56	0.02	-97	0.25	0.11	-58	0.04	-85
MAE 73	0.37	0.26	-30	0.11	-71	0.26	0.11	-56	0.06	-78
MAE 74	0.57	0.33	-43	0.12	-79	0.23	0.18	-23	0.05	-81
MAE 75	0.52	0.45	-13	0.15	-72	0.27	0.12	-57	0.03	-90
MAE 76	0.29	0.13	-56	0.06	-80	0.32	0.07	-77	0.03	-89
MAE 77	0.53	0.15	-71	0.14	-73	0.31	0.20	-31	0.04	-88
MAE 78	0.49	0.24	-50	0.05	-90	0.25	0.13	-47	0.02	-90
MAE 79	1.05	0.58	-45	0.13	-88	0.34	0.13	-62	0.03	-91
MAE 80	0.45	0.19	-57	0.10	-77	0.28	0.13	-54	0.01	-95
MAE 81	0.81	0.41	-50	0.05	-94	0.33	0.13	-61	0.03	-93
MAE 82	0.69	0.29	-58	0.06	-92	0.25	0.13	-50	0.02	-93
MAE 83	0.48	0.25	-49	0.04	-91	0.26	0.12	-55	0.01	-95
MAE 84	0.59	0.26	-56	0.09	-86	0.25	0.12	-50	0.04	-83
MAE 85	0.36	0.23	-37	0.02	-94	0.26	0.12	-54	0.02	-91
MAE 86	0.90	0.40	-55	0.11	-87	0.24	0.09	-63	0.01	-94
MAE 87	0.70	0.30	-57	0.05	-93	0.21	0.11	-48	0.02	-91
MAE 88	0.63	0.14	-77	0.03	-95	0.22	0.16	-26	0.01	-94
MAE 89	1.12	0.67	-41	0.22	-80	0.33	0.11	-66	0.03	-90
MAE 90	0.95	0.27	-71	0.10	-89	0.28	0.08	-71	0.01	-95
MAE 91	0.65	0.28	-58	0.06	-91	0.25	0.11	-56	0.02	-93
MAE 92	1.07	0.57	-47	0.16	-85	0.32	0.16	-44	0.03	-91
MAE 93	0.55	0.05	-92	0.01	-98	0.22	0.01	-93	0.01	-95
MAE 94	0.71	0.31	-56	0.11	-85	0.24	0.11	-55	0.04	-83
MAE 95	0.62	0.22	-65	0.12	-81	0.22	0.06	-72	0.03	-85
MAE 96	0.60	0.32	-46	0.06	-90	0.26	0.15	-43	0.02	-93

MAE 97	0.79	0.30	-62	0.04	-95	0.21	0.07	-68	0.03	-86
MAE 98	0.92	0.56	-39	0.14	-85	0.20	0.10	-50	0.02	-88
MAE 99	0.51	0.17	-67	0.07	-86	0.13	0.05	-65	0.02	-87
MAE 100	0.81	0.33	-57	0.07	-90	0.19	0.10	-47	0.01	-95
MAE 101	0.86	0.26	-70	0.10	-88	0.23	0.10	-58	0.02	-91
MAE 102	0.82	0.58	-27	0.09	-88	0.25	0.13	-46	0.02	-94
MAE 103	0.98	0.72	-26	0.24	-76	0.27	0.17	-37	0.11	-60
MAE 104	0.97	0.48	-51	0.04	-96	0.26	0.17	-32	0.02	-93
MAE 105	1.26	0.47	-63	0.28	-78	0.28	0.11	-62	0.05	-84
MAE 106	0.82	0.28	-65	0.12	-85	0.36	0.13	-63	0.04	-89
MAE 107	0.89	0.16	-82	0.04	-96	0.34	0.02	-93	0.03	-92
MAE 108	0.53	0.35	-34	0.04	-93	0.21	0.10	-52	0.06	-71
MAE 109	0.57	0.15	-74	0.03	-95	0.15	0.02	-89	0.01	-92
MAE 110	0.43	0.22	-49	0.02	-95	0.23	0.15	-35	0.02	-93
MAE 111	0.93	0.22	-76	0.14	-85	0.25	0.11	-56	0.04	-86
MAE 112	1.29	0.84	-34	0.21	-84	0.34	0.18	-46	0.05	-86
MAE 113	1.12	0.66	-36	0.12	-87	0.32	0.15	-54	0.02	-95
MAE 114	0.46	0.12	-74	0.12	-73	0.30	0.10	-66	0.09	-69
MAE 115	1.07	0.69	-36	0.35	-68	0.31	0.11	-64	0.08	-73
MAE 116	1.51	0.51	-67	0.12	-92	0.45	0.14	-70	0.11	-76
MAE 117	0.93	0.34	-63	0.19	-80	0.14	0.01	-90	0.01	-92
MAE 118	0.81	0.61	-25	0.13	-83	0.23	0.13	-44	0.03	-85
MAE 119	0.93	0.37	-60	0.19	-80	0.34	0.13	-60	0.07	-79
MAE 120	0.38	0.29	-24	0.02	-95	0.29	0.23	-21	0.01	-95

Toksik B ve tuz stresi koşullarında yetiştirilen mısır genotipleriyle kontrol gruplarından alınan gövde ve kök kuru ağırlıklarına ait değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Toksik B ve tuz stresi koşullarında yetiştirilen mısır genotipleri kontrole göre gövde ve kök kuru ağırlıklar değerlerinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Çizelge 4.1’de gösterildiği stres koşulları altındaki mısır genotipleri kontrolleriyle karşılaştırılması sonucu elde edilen % değişimlerdeki azalış göre değerlendirilmiştir. Tarama aşamasında kullanılan 120 genotipte gövde kuru ağırlıkları kontrol grubunda 0.11 – 1.51 g, 4 mM B uygulamasında 0.04 – 0.84 g arasında değişim göstermiştir. Kontrole göre toksik B koşullarında gövde kuru ağırlıkları MAE 42 genotipi %11 oranında, MAE 103 genotipi %26 oranında, MAE 45 genotipinde %77 oranında ve MAE 93 genotipinde %92 oranlarında azalma gösterdiği belirlenmiştir. Gövde kuru ağırlıkları kontrol grubunda 0.11 – 1.51 g, tuz stresi koşullarında 0.01 – 0.38 g arasında değişim göstermiştir. Kontrole göre tuz stresi koşullarında gövde kuru ağırlıkları MAE 23 genotipinde %59 oranında, MAE 103 genotipi %76 oranında, MAE 45 genotipi %91 oranında ve MAE 61 genotipinde %98

oranlarında azalma gösterdiği belirlenmiştir.

Kök kuru ağırlıkları kontrol grubunda 0.13 – 0.45 g, 4 mM B uygulamasında 0.01 – 0.23 g arasında değişim göstermiştir. Kontrole göre toksik B koşullarında kök kuru ağırlıkları MAE 120 genotipinde %21 oranında, MAE 103 genotipi %37 oranında, MAE 45 genotipinde %88 oranında ve MAE 5 genotipinde %94 oranlarında azalma gösterdiği belirlenmiştir. Kök kuru ağırlıkları kontrol grubunda 0.13 – 0.45 g, tuz stresi koşullarında 0.01 – 0.20 g arasında değişim göstermiştir. Kontrole göre tuz stresi koşullarında kök kuru ağırlıkları MAE 21 genotipinde %37 oranında, MAE 103 genotipi %60 oranında, MAE 45 genotipi %95 oranında ve MAE 56 genotipinde %97 oranlarında azalma gösterdiği belirlenmiştir

Taramalarda mısır genotiplerinin gövde ve kök kuru ağırlık değerlerine göre değerlendirmeler sonucunda B toksitesine toleranslı ve tuza dayanıklı MAE 103 ve B toksitesine toleranssız ve tuza dayanıksız MAE 45 mısır genotipleri belirlenerek ana deneme kurulmuştur.

4.2. Ana Deneme

4.2.1. Büyüme Parametreleri

Tuzlu (150 mM NaCl) ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının (0 mM B , 0.50 mM B ve 4 mM B) mısır genotiplerinin gövde ve kök yaş ağırlığı, gövde ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyu değerlerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.2, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin gövde ve kök yaş ağırlığı, gövde ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyu değerlerine ait varyans analiz sonuçları

Kareler Ortalaması							
Uygulamalar	S.D.	Gövde Yaş Ağırlığı	Kök Yaş Ağırlığı	Gövde Kuru Ağırlığı	Kök Kuru Ağırlığı	Gövde Boyu	Kök Boyu
Genotip (G)	1	2694.78**	651.26**	8.28**	3594.04**	369.64**	775.64**
Tuz Uyg. (T)	1	17206.64**	1339.52**	2121.21**	8684.01**	5174.13**	5753.53**
Bor Uyg. (B)	3	519.19**	359.84**	238.37**	1202.91**	105.24**	1084.68**
GxT İnt.	1	274.36**	22.78**	212.05**	590.08**	11.39**	17.41**
GxB İnt.	3	17.33**	34.97**	7.96**	140.35**	7.51**	5.60**
TxB İnt.	3	301.49**	102.08**	60.52**	326.91**	29.08**	468.77**
GxTxB İnt.	3	5.22**	15.96**	10.55**	26.58**	6.55**	18.62**
Hata	32						
Genel	47						

**, p<0.01 ; , Uyg.: uygulama; İnt: interaksiyon; S.D.:Serbestlik derecesi

Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, gövde ve kök yaş ağırlığı, gövde ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyu değerleri üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.2).

Mısır genotiplerinin gövde ve kök yaş ağırlığı, gövde ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyu değerleri bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi koşullarında azalmıştır. Bu azalmalar MAE 103 genotipinde sırasıyla %2 ile %60, %21 ile %57, %6 ile %64, %14 ile %68, %12 ile %55 ve %10 ile %45 arasında değişirken, MAE 45 genotipinde %33 ile %66, %39 ile %80, %24 ile %50, %21 ile %59, %13 ile %64 ve %13 ile %47 arasında değiştiği belirlenmiştir.

GxTxB interaksiyonunda en yüksek gövde yaş ağırlığı değerleri yeterli B uygulamasında (B2, 0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotipler dikkate alındığında kontrollerine göre en fazla artışlar MAE 103 (bor toksisitesine toleranslı ve tuza dayanıklı olan) ve MAE 45 (bor toksisitesine toleranssız ve tuza dayanıksız olan) genotiplerinde sırasıyla %11 ve %5 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. MAE 103 genotipinde gövde yaş ağırlığına ait yapılan LSD testine göre B1 ve B2 uygulamaları arasında ve tuz stresi koşullarında bor uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark bulunmazken diğer uygulamalar arasında farklar önemli bulunmuştur. MAE 45 genotipinde ise B1 ve B3; tuz stresi koşullarında T+B2 ve T+B3 arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

En yüksek kök yaş ağırlığı GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde yeterli B uygulamasından (B2, 0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotiplerin kontrollerine göre en fazla artışlar sırasıyla %64 ve %25 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde kök yaş ağırlığına ait yapılan LSD testine göre B2 uygulaması istatistiki bakımdan önemli bulunmuştur. MAE 103 genotipinde tuz stresi koşullarında T+B1, T+B0 ve T+B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir. MAE 45 genotipinde tuz stresi koşullarında T+B1 ve T+B0 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

En yüksek gövde kuru ağırlığı GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde yeterli B uygulamasından (B2, 0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotipler kontrollerine göre en fazla artışlar sırasıyla %20 ve %9 oranlarında

olduğu belirlenmiştir. MAE 103 genotipinde gövde kuru ağırlığına ait yapılan LSD testine göre B2 uygulaması istatistiki bakımdan önemli bulunurken; B1 ve B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir. MAE 45 genotipinde B1 ve B2 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde tuz stresi koşullarında T+B1 ve T+B0 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

En yüksek kök kuru ağırlığı GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde yeterli B uygulamasından (B2, 0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotipler kontrollerine göre en fazla artışlar sırasıyla % 39 ve %26 oranlarında olduğu tespit edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde kök kuru ağırlığına ait yapılan LSD testine göre B2 uygulamasında istatistiki bakımdan önemli bulunduğu belirlenmiştir. MAE 103 genotipinde tuz stresi koşullarında T+B1 ve T+B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir. MAE 45 genotipinde tuz stresi koşullarında T+B1 ve T+B2 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

En yüksek gövde boyu GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde yeterli B uygulamasından (B2, 0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotipler kontrollerine göre en fazla artışlar sırasıyla %5 ve %3 oranlarında olduğu belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde gövde boyuna ait yapılan LSD testine göre B1 ve B2 uygulamaları istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir. MAE 103 genotipinde tuz stresi koşullarında T+B1, T+B2 ve T+B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir. MAE 45 genotipinde tuz stresi koşullarında T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

En yüksek kök boyu GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde yeterli B uygulamasından (B2, 0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotiplerin kontrollerine göre en fazla artışlar sırasıyla %16 ve %14 olup B2 uygulaması ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde kök boyuna ait yapılan LSD testine göre B2 uygulamasında istatistiki bakımdan önemli bulunduğu belirlenmiştir. MAE 103 genotipinde LSD testine göre B2 uygulaması istatistiki bakımdan önemli olduğu belirlenmiştir. MAE 103 genotipinde tuz stresi koşullarında T+B1 ve T+B3 uygulamaları; MAE 45 genotipinde ise T+B1 ve T+B0 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

Genotiplerin gövde ve kök yaş ağırlığı, gövde ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyu değerleri tuz stresi koşullarında bor uygulamalara bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (T+B1) uygulamasına göre azalmıştır.

En yüksek gövde yaş ağırlığı GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamasından (T+B2, 150 mM NaCl+0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotiplerde en fazla artışlar gövde yaş ağırlığı kontrollerine (T+B1) göre sırasıyla %10 ve %8 olup T+B2 uygulaması ile elde edilmiştir.

En yüksek kök yaş ağırlığı GxTxB interaksiyonunda MAE ve MAE 45 genotiplerinde tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamasından (T+B2,150 mM NaCl+0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotiplerde en fazla artışlar kontrollerine (T+B1) göre sırasıyla %37 ve %18 olup T+B2 uygulaması ile elde edilmiştir.

En yüksek gövde kuru ağırlığı GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamasından (T+B2,150 mM NaCl+0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotiplerde en fazla artışlar gövde kuru ağırlığı kontrollerine (T+B1) göre sırasıyla %23 ve %31 olup T+B2 uygulaması ile elde edilmiştir.

En yüksek kök kuru ağırlığı GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamasından (T+B2,150 mM NaCl+0.5 mM B) elde edilmiştir. Uygulamada kullanılan genotiplerde en fazla artışlar kök kuru ağırlığın kontrollerine (T+B1) göre sırasıyla %19 ve %7 olup T+B2 uygulaması ile elde edilmiştir.

En yüksek gövde boyu GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamasından (T+B2,150 mM NaCl+0.5 mM B) elde edilmiştir. Ayrıca MAE 103 genotipinin gövde boyu kontrole (T+B1) göre en fazla artış (%3) T+B2 uygulaması ile elde edilmiştir.

En yüksek kök boyu GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamasından (T+B2,150 mM NaCl+0.5 mM B) elde edilmiştir. Ayrıca her iki genotipte de kök boyu kontrollerine (T+B1) göre en fazla artışlar sırasıyla %6 ve %21 olup T+B2 uygulaması ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının MAE 103 mısır genotipinin gövde ve kök yaş ağırlığı, gövde ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyunun üzerine etkisi

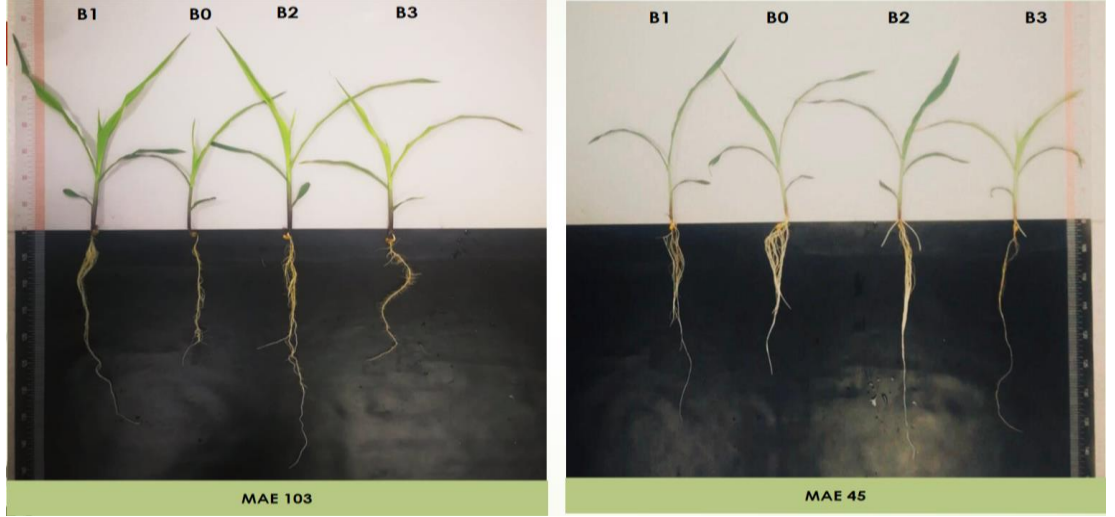
Uygulamalar	Gövde Yaş Ağırlığı (g bitki ⁻¹)			Kök Yaş Ağırlığı (g bitki ⁻¹)			Gövde Kuru Ağırlığı (g bitki ⁻¹)			Kök Kuru Ağırlık (g bitki ⁻¹)			Gövde Boyu (cm)			Kök Boyu (cm)		
	% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim		
B1	3.34ab	--		0.94b	--		0.27b	--		0.07b	--		42.20a	--		40.63b		
B0	2.48c	-26		0.70c	-25		0.18c	-31		0.05d	-28		35.70b	-15		28.06d	-31	
B2	3.72a	11		1.54a	64		0.32a	20		0.09a	39		44.25a	5		47.10a	16	
B3	3.28b	-2		0.74c	-21		0.25b	-6		0.06c	-14		37.34b	-12		36.47c	-10	
T+B1	1.38d	-59	--	0.51d	-46	--	0.13e	-52	--	0.03f	-49	--	23.45c	-44	--	26.00e	-36	
T+B0	1.32d	-60	-4	0.40d	-57	-22	0.12e	-57	-11	0.02g	-68	-37	19.15d	-55	-18	22.47f	-45	24
T+B2	1.52d	-54	10	0.70c	-26	37	0.16cd	-41	23	0.04e	-40	19	24.10c	-43	3	27.50de	-32	-10
T+B3	1.48d	-56	7	0.52d	-45	2	0.14de	-48	8	0.03f	-48	3	22.35c	-47	-5	25.93e	-36	0

Çizelge 4.4. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının MAE 45 mısır genotipinin gövde ve kök yaş ağırlığı, gövde ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyunun üzerine etkisi

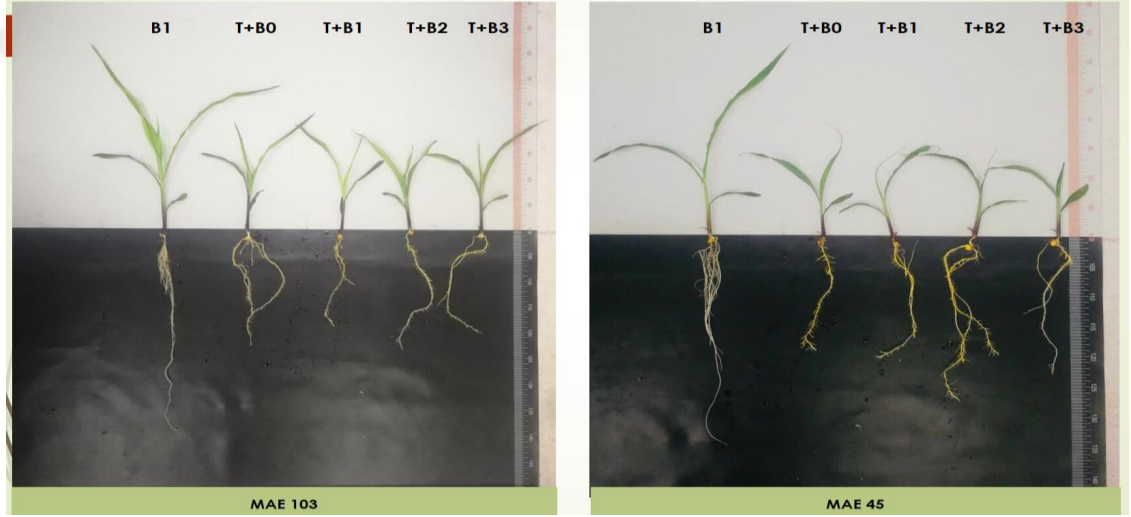
Uygulamalar	Gövde Yaş Ağırlığı (g bitki ⁻¹)			Kök Yaş Ağırlığı (g bitki ⁻¹)			Gövde Kuru Ağırlığı (g bitki ⁻¹)			Kök Kuru Ağırlığı (g bitki ⁻¹)			Gövde Boyu (cm)			Kök Boyu (cm)		
	% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim		
B1	2.62b			0.76b			0.24a			0.04b			38.17a			36.92b		
B0	1.75c	-33		0.43cd	-44		0.16bc	-33		0.03c	-26		32.05b	-16		20.89e	-43	
B2	2.76a	5		0.96a	25		0.27a	9		0.06a	26		39.42a	3		42.20a	14	
B3	2.38b	-9		0.46c	-39		0.19b	-24		0.04c	-21		33.33b	-13		32.10c	-13	
T+B1	1.04d	-60		0.35e	-55		0.11e	-56		0.02de	-46		19.88c	-48		19.94e	-46	
T+B0	0.96f	-63	-8	0.32e	-58	-7	0.10e	-60	-9	0.02f	-59	-25	14.94d	-61	-25	19.50e	-47	-2
T+B2	1.12e	-57	8	0.41d	-47	18	0.14cd	-43	31	0.03d	-42	7	16.00d	-58	-20	24.14d	-35	21
T+B3	0.90e	-66	-13	0.15f	-80	-56	0.13de	-48	19	0.02e	-52	-11	13.74d	-64	-31	23.41d	-37	17

Duncan testine göre küçük harfler aynı sütundaki ortalamalar arasındaki önemliliği ifade etmektedir

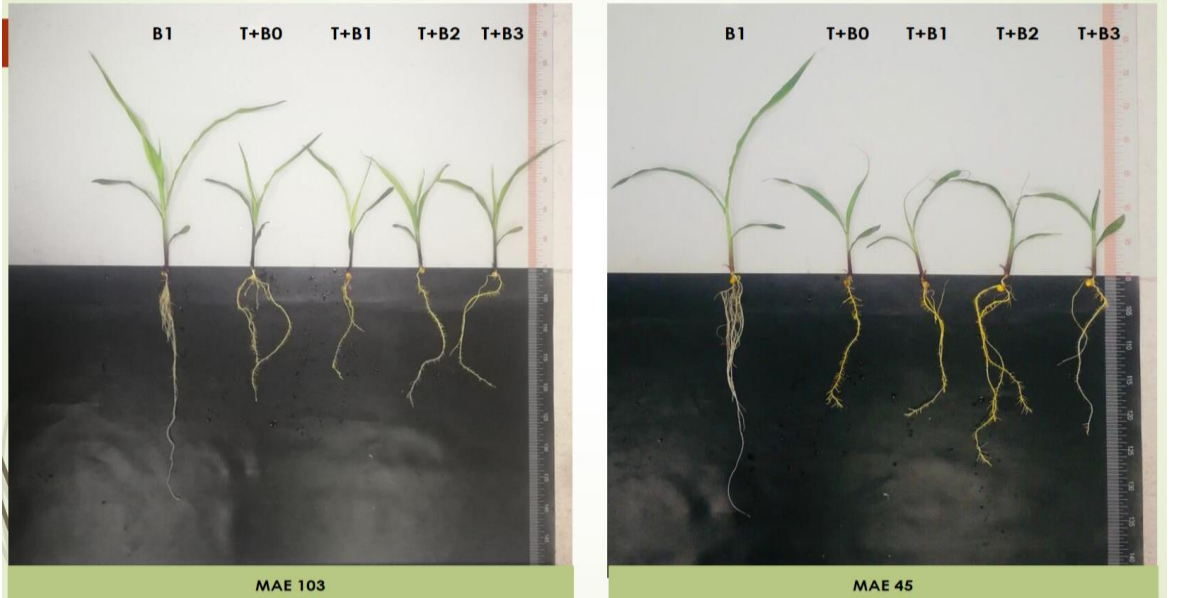
Mısır genotiplerinin gövde ve kök yaş ağırlığı, gövde ve kök kuru ağırlığı, gövde ve kök boyu değerleri kontrol (B1)'e göre B2 uygulamalarında artarken; tuz stresi koşullarında azalış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak tuz stresi koşullarına (T+B1) göre T+B2 uygulamalarında artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumda tuz stresi bitkide öncelikli olarak ozmotik stres ve iyon toksisitesi oluşturarak köklerin besin alımını azaltabilir. Ayrıca bitkinin kök bölgesinde Na ve Cl iyonlarının birikmesi bitkinin kök gelişimini engelleyerek ve fotosentez süreçlerini bozarak bitkide azalmalara neden olabilmektedir. Tuz stresi koşullarında yeterli B (T+B2) uygulamasında, tuz stresinin bu olumsuz etkilerine karşı tolerans sağlayarak bitkinin büyüme parametrelerinde artış gösterebilmiştir. Bitkilerde meydana gelen bu artış MAE 103 genotipinde daha fazla oranlarda olduğu belirlenmiştir. Benzer olarak, Hamurcu ve ark, (2020) tarafından su kültürü ortamında iki farklı hibrit mısır çeşidine (bor toleranslı RX 770 ve bor duyarlı TTM 8119) farklı B dozlarının (0, 2.5. 25 ve 50 ppm B) bitkinin gelişimi üzerine etkilerinin incelendiği araştırmada B dozlarına bağlı olarak bitkinin gövde ile kök boylarında, yaş ve kuru ağırlıklarında artışlar olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca yeterli B bitkide fotosentezi, polen oluşumunu, nükleik asit biyosentezi ve nişasta metabolizmasında rol oynadığı belirlenmiştir (Alharby ve ark., 2021). Bitkiler tuz uygulamalarına göre bor uygulamalarında fizyolojik ve morfolojik olarak daha az etkilenme gösterirler ve bor bitkilerde tuz stresi ile mücadele ederek bu stresi tolere etmek için çeşitli mekanizmalar geliştirdiğini belirlenmiştir (Kayıhan ve ark., 2016;Güneş ve ark., 2017; García-Sánchez ve ark., 2020).



Resim 4.1. Tuzsuz koşullarda bor uygulamalarında MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin gövde ve kök boylarına ait görseller



Resim 4.2. Tuzlu koşullarda bor uygulamalarında MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin gövde ve kök boylarına ait görseller



Resim 4.3. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarında MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin gövde ve kök boylarına ait görseller

4.2.2. RWC, Prolin, EC, MDA, OH[·] süpürölme aktivitesi ve H₂O₂ içerikleri

Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin Uygulamaların mısır genotiplerinin RWC, prolin, EC, MDA, OH[·] ve H₂O₂ değerlerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.5, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.6 ve 4.7' de ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin RWC, prolin, EC, MDA, OH[·] ve H₂O₂ değerlerine ait varyans analiz sonuçları

Kareler Ortalaması							
Uygulamalar	S.D.	RWC	Prolin	EC	MDA	OH [·]	H ₂ O ₂
Genotip (G)	1	219.40 **	15256.54 **	989.23**	576 **	2797.84**	16332.46**
Tuz Uyg. (T)	1	1232.39 **	229731.81**	18257.98**	1769 **	2347.52**	273427.74**
Bor Uyg. (B)	3	53.82 **	9176.26**	166.90**	144 **	248.87**	2036.06**
GxT İnt.	1	24.30 **	14264.41**	109.73**	74 **	423.79**	1138.22**
GxB İnt.	3	3.75 *	1267.96**	5.04**	3 *	49.35**	280.28**
TxB İnt.	3	4.42 **	10380.82**	460.35**	157 **	41.07**	8936.80**
GxTxB İnt.	3	4.12 **	1221.32**	35.07**	11 **	139.55**	283.29**
Hata	32						
Genel	47						

**, p<0.01 , ; Uyg.: uygulama; İnt: interaksiyon; S.D.:Serbestlik derecesi

Çizelge 4.6. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının MAE 103 mısır genotipinin RWC, prolin, EC, MDA, OH[·] ve H₂O₂ değerleri üzerine etkisi

Uygulamalar	RWC		PROLİN (nmol g ⁻¹ YA)			EC		MDA (mol g ⁻¹ YA)		·OH [·] süpürülme aktivite (nmol g ⁻¹ YA)			H ₂ O ₂ içeriği (nmol g ⁻¹ YA)		
	% değişim		% değişim			% değişim		% değişim		% değişim			% değişim		
B1	92.49 bc	-	0.01f	-	9.09 h	-	17.12 e	-	81.42 f	-	211.65 h	-			
B0	90.84 c	-2	0.03ef	138	21.38 f	135	22.75 bc	33	85.75 c	5	263.03 f	24			
B2	94.83 ab	3	0.03ef	96	18.33 g	102	21.25 cd	24	82.13 f	1	251.85 g	19			
B3	96.08 a	4	0.05e	299	24.35 e	168	19.20 de	12	84.11 d	3	324.47 e	53			
T+B1	81.10 de	-12 -	1.20a	8861 -	60.02 b	560	34.36 a	101	87.41 b	7 -	455.65 b	115			
T+B0	80.34 e	-13 -1	0.97b	7116 -18	65.04 a	615	37.31 a	118	9 88.52 a	9 1	471.74 a	123	4		
T+B2	83.02 d	-10 2	0.88c	6451 -27	55.12 c	506	-8 25.58 b	49	-26 85.15 c	5 -3	444.60 c	110	-2		
T+B3	82.15 de	-11 1	0.48d	3467 -60	51.77 d	469	-14 21.86 cd	28	-36 83.28 e	2 5	419.77 d	98	-8		

Çizelge 4.7. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının MAE 45 mısır genotipinin RWC, prolin, EC, MDA, OH[·] ve H₂O₂ değerleri üzerine etkisi

Uygulamalar	RWC		PROLİN (nmol g ⁻¹ YA)			EC		MDA (nmol g ⁻¹ YA)		·OH [·] süpürülme aktivite (nmol g ⁻¹ YA)			H ₂ O ₂ içeriği (nmol g ⁻¹ YA)		
	% değişim		% değişim			% değişim		% değişim		% değişim			% değişim		
B1	96.36 ab	-	0.02g	-	11.94 g	-	19.76 f	-	83.33 f	-	259.93 h	-			
B0	93.53 bc	-3	0.04f	81	28.40 f	138	28.38 d	44	89.18 e	7	291.92 f	12			
B2	97.49 a	1	0.04f	55	24.91 f	109	26.40 d	34	84.11 f	2	279.92 g	8			
B3	98.62 a	2	0.06e	137	34.60 e	190	23.64 e	20	86.61 f	4	361.68 e	39			
T+B1	86.75 e	-10 -	2.10a	8554 -	76.51 b	541	- 45.52 a	130 -	92.48 c	11 -	525.59 b	102	-		
T+B0	83.29 f	-14 -4	1.70b	6894 -19	81.23 a	580	6 42.72 b	116 -6	94.37 b	13 2	562.05 a	116	7		
T+B2	91.47 cd	-5 5	1.41c	5692 -33	69.67 c	483	-9 35.25 c	78 -23	90.35 d	8 -2	490.43 c	89	-7		
T+B3	88.59 de	-8 2	0.61d	2398 -71	57.97 d	385	-24 33.47 c	69 -26	96.02 a	15 4	458.30 d	76	-13		

Duncan testine göre küçük harfler aynı sütundaki ortalamalar arasındaki önemliliği ifade etmektedir.

4.2.2.1. Bağıl Su İçeriği (RWC)

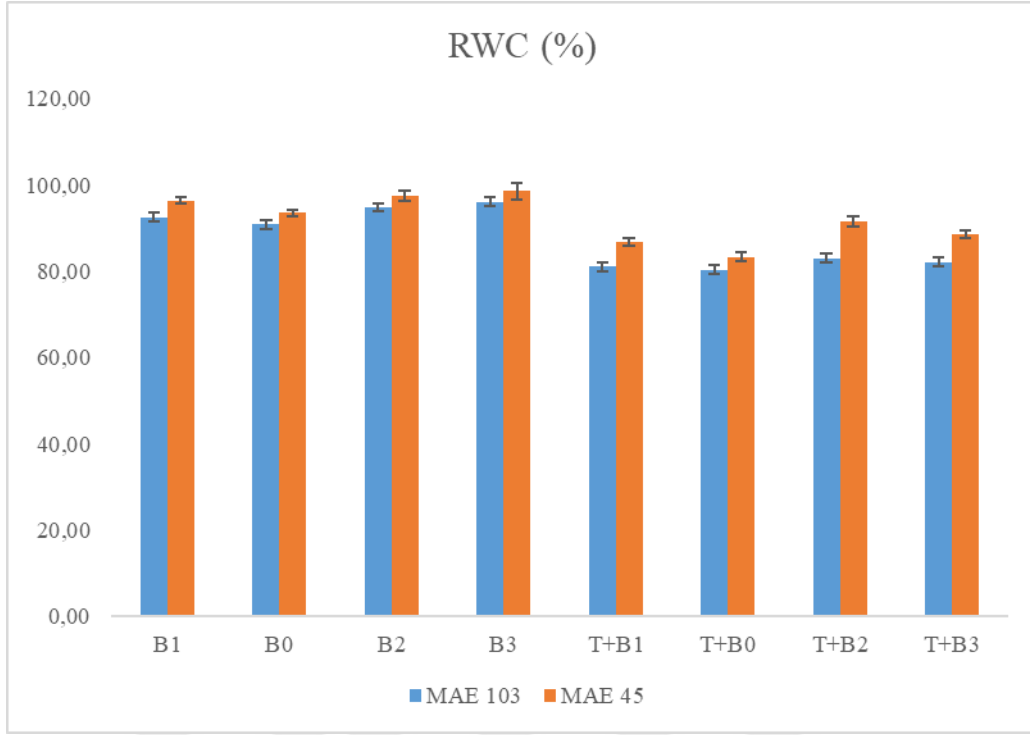
Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, RWC değerleri üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.5).

Mısır genotiplerinin RWC değerleri bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında azalmıştır. Bu azalma MAE 103 ve MAE 45 genotipleri B1'e göre B0, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %2 ile %3, %12 ile %10, %13 ile %14, %10 ile %5 ve %11 ile %8 oranlarında olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7)

En yüksek RWC değerleri GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotipinde sırasıyla %96.08 ve %98.62 olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. Her iki genotipte de B1'e göre (%92.49 ve %96.36) en fazla artışlar sırasıyla %4 ve %2 olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. RWC değerlerine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde B2 ve B3 uygulamalarında; MAE 45 genotipinde B1, B2 ve B3 uygulamalarında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

Mısır genotiplerinin RWC değerleri tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotipleri T+B1'e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %1 ile %4 oranlarında azalış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek RWC değerleri GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotipinde sırasıyla %83.02 ve %91.47 olarak belirlenmiş olup T+B2 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde sırasıyla T+B1'e göre (%81.10 ve %86.75) en fazla artışlar sırasıyla %2 ve %5 oranlarında T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde tuz stresi koşullarında T+B1 ve T+B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir. MAE 45 genotipinde tuz stresi koşullarında uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.



Şekil.4.1. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotipinin RWC değerleri üzerine etkisi

RWC bitkilerde terleme hızı ile yapraklardaki su rezervi arasındaki dengeyi gösteren ve hücre hacmiyle yakın ilişkili bir parametredir (Lugojan ve Ciulca, 2011).

Mısır genotiplerinin RWC değerleri B0 uygulamalarında azalırken, B2 ve B3 uygulamalarında artış göstermesinde borun yaprakların su tutma kapasitesi üzerinde etkili olabilir. Mısır genotiplerinin yapraklarının su kaybetmesinden dolayı RWC değerleri tuz stresi koşullarında azalma göstermiştir. Ancak tuz stresi koşullarında yeterli B (T+B2) uygulamasında RWC değerleri artış göstererek tuz stresinden kaynaklı bitkide meydana gelen toksik etkilerini azaltıcı yönde etkileyebilir. Stres koşullarında bitkinin su içeriğini ortaya koyan parametrelerden olan RWC’de en fazla artışı B3 (toksik B) uygulamasında MAE 45 mısır genotipinden elde edilmiştir. RWC değerlerinde meydana gelen bu artışın bor bitki metabolizmasındaki suyun etkin kullanımını sağlayarak bitkinin su tutma kapasitesini artırmakta olup genotipler arasındaki farklılıkları ortaya koymaktadır. Tuz stresinde toprak su potansiyeli (Ψ) negatif hale geçerek bitkinin su alımını engeller ve bitkiler bozulan su durumunu algılayarak sürgünlere sinyal göndererek bitki metabolizmasının ayarlanmasını sağlamaktadır (Schubert., 2009; Bonilla ve Gonzalez-Fontes., 2011). Sonuçlarımıza benzer olarak, bor uygulamaları hibrit mısır çeşitlerinin RWC değerlerinde artış gösterdiğini bildirmişlerdir (Hamurcu ve ark., 2020).

4.2.2.2. Prolin içeriği

Uygulamaların mısır genotiplerinin prolin içeriklerine ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.5, elde edilen ortalama değeri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 de ve bu değeriye ait grafikler Şekil 4.2’de verilmiştir.

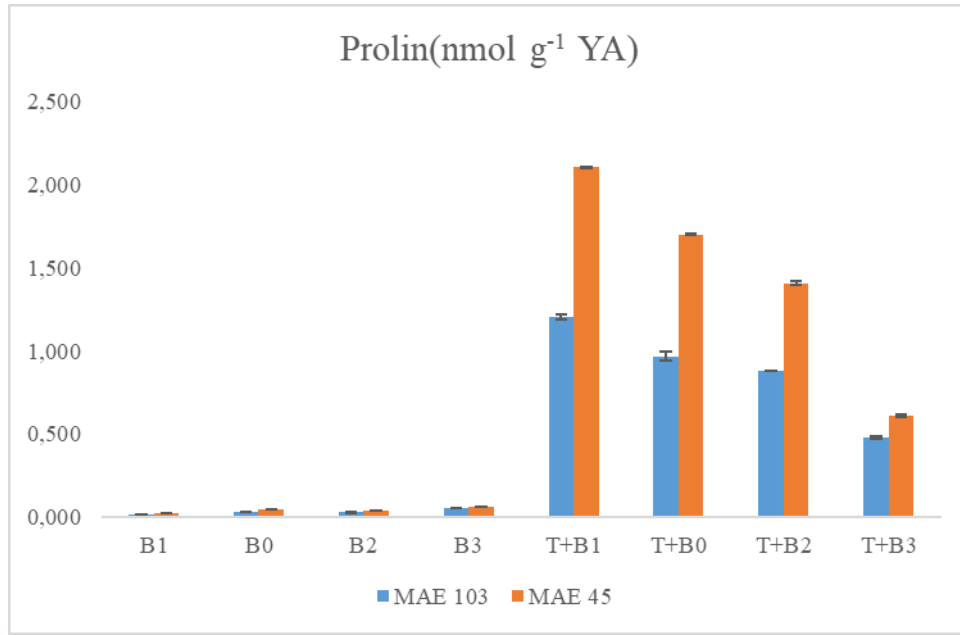
Uygulamaların GxTxB interaksionuna etkileri incelendiğinde, prolin içerikleri üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.5).

Mısır genotiplerinin prolin içerikleri bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağılı olarak değışmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Bu artış MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0, B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla 2.5 kat ile 1.8 kat, 2.0 kat ile 1.6 kat, 4.0 kat ile 2.4 kat, 120 kat ile 105 kat, 97 kat ile 85 kat, 88 kat ile 71 kat, 48 kat ile 31 kat arasında prolin içerikleri değışim gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek prolin içerikleri GxTxB interaksionunda MAE 103 ve MAE 45 genotipinde sırasıyla 0.05 nmol g-1 YA ve 0.06 nmol g-1 YA olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. Her iki genotipte de B1’e göre (0.01 nmol g-1 YA ve 0.02 nmol g-1 YA) en fazla artışlar sırasıyla 4.0 kat ile 2.4 kat olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde prolin içeriklerine ait yapılan LSD testine göre B0 ve B2 uygulamalarında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

Mısır genotiplerinin prolin içerikleri tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağılı olarak değışim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotipleri T+B1’e göre T+B0, T+B2, T+B3 uygulamalarında sırasıyla %18 ile %19, %27 ile %33, %60 ile %71 oranlarında azalış gösterdiği belirlenmiştir.

En düşük prolin içerikleri GxTxB interaksionunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (0.48 nmol g-1 YA ve 0.61 nmol g-1 YA) belirlenmiş olup T+B3 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde sırasıyla T+B1’e göre (1.20 nmol g-1 YA ve 2.10 nmol g-1 YA) en fazla azalmalar %60 ve %71 oranlarında belirlenmiş olup T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil.4.2. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotipinin prolin içerikleri üzerine etkisi

Prolin, sitozelde biriken, hücre altı yapıları (zarlar ve proteinler) stabilize eden, redoks potansiyelini düzenleyen ve serbest radikal üretimini engileyerek ozmotik ayarlamada görev yapan çok işlevli bir amino asittir (Bonilla ve González, 2011; Cervilla ve ark., 2012). Çalışmamızda, tuz stresi koşullarında mısır genotiplerinin prolin içerikleri diğer uygulamalara göre daha fazla artış göstermiştir (Çizelge 4.6 ve 4.7). Ancak tuz stresi koşullarında MAE 45 mısır genotipinin prolin içeriğindeki artış istatistik bakımından önemli bulunmuştur. Prolin içeriğindeki artış MAE 45 mısır genotipinde ROT'ların üretimini engelleyerek sitoplazmik organelleri ve hücre yapısını koruyarak tuz stresine tolerans gösterebilir. Tuz stresi, bitkinin ROT üretimini MAE 45 mısır genotipinde MAE 103 mısır genotipine göre daha fazla artırabilir. Bu durumda prolin, antioksidan özelliği sayesinde serbest radikalleri nötralize ederek hücre hasarını azaltabilir. Ayrıca tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamasında prolin içerikleri azalma göstererek bitki hücrelerindeki osmotik dengeyi korumaya yardımcı olabilir. Prolin, hücre içindeki osmotik basıncı artırarak suyun hücre içinde kalmasına yardımcı olarak, bitkinin susuzluğa karşı daha dayanıklı olmasını sağlayabilir. Tuz stresi koşullarında tuza hassas olan MAE 45 mısır genotipi prolin birikimini daha fazla artırarak stresten korunabilmeyi sağlamıştır. Prolin bitkilerde stres koşullarında biriken bir ozmolit olması nedeniyle mısır genotiplerinde tuz stresine toleransı sağlayabilmiştir. Ayrıca tuz stresi koşullarında bor uygulamaları her iki mısır genotipinin prolin içeriklerini azaltması bitkinin stres koşullarına adaptasyonunu ve savunma mekanizması olarak değerlendirilebilir. Mısır

genotiplerinin prolin içerikleri genotipler arasında farklılıkları ortaya koyduğu belirlenmiştir. Bitkilerde prolin ozmotik ayarlamaların yanında protein döngüsünü koruyarak, antioksidan savunma mekanizmasını artırarak, gaz değişimini ve klorofil floransını düzenleyerek tuz stresi toleransını uyarılmasında rol oynadığını bildirmişlerdir (Ali ve ark., 2007; Deivanai ve ark., 2011; Ben Rejeb ve ark., 2014; Ismail, 2014). Çalışmamıza benzer olarak, tuz stresi koşullarında mısır, buğday ve soya bitkilerinin prolin içeriklerinde artış olduğu belirlenmiştir (Farooq 2015; Elkelish ve ark., 2019a; Alharby ve ark., 2020). Stres koşullarında prolin, bitkinin mitokondrilerini, kloroplastlarını ve DNA'sını oksidatif hasarlanmalardan koruyarak fotosentetik süreçlerin iyileşmesini sağlayarak çözünür şeker birikimini artırmaktadır (Khan ve ark., 2014). Aynı zamanda prolin proteinle uyumlu hidrotrop olarak da işlev görebilmekte ve bitki metabolizma ile denge bulunan NADP+/NADPH oranlarının korunmasında rol oynayabilir (Hayat ve ark., 2012).

Araştırma bulgularımıza benzer olarak, laboratuvar şartlarında tuz stresi oluşturarak tuz konsantrasyonlarında (50 mM, 100 mM, 150 mM, 200 mM ve 250 mM NaCl) mısır çeşitlerinin (Syngenta 7720, Syngenta 6668, eco-91, Syngenta 7710, Advanta Pac 751 ve Vertex 751) prolin içeriğine etkisinin araştırıldığında artan tuz konsantrasyonlarında mısır çeşitlerinin prolin içerikleride artış gösterdiği belirlenmiştir (Pingle ve ark., 2022). Ayrıca tuz stresi koşullarında mısır genotiplerinin fide büyümesi üzerine etkilerinin incelendiğinde araştırmada prolin içeriklerinde artmakta ve bu artışlar mısır genotipleri arasında farklı düzeylerde prolin birikimi olduğunu bildirmişlerdir (Hussain ve ark., 2022). Elde edilen bulgularımıza paralel olarak, mısırdaki (Kaya ve ark., 2010), soya fasulyesinde (Tramontano ve Jouve 1997) ve şeker pancarında (Ghoulam ve ark., 2002) tuz stresinde önemli düzeyde prolin birikimine neden olduğunu belirtmişlerdir. Ersöz, (2009) Sultani çekirdeksiz üzüm ve 6 farklı Amerikan asmaşının anacı olan (5 BB, 41 B, 99 R, 110 R, 1103 P, 1616 C) üzümlerin bor (2 mM B) ve tuz stresinin (25 mM ve 50 Mm NaCl) etkileri incelendiğinde artan tuz dozlarında bor uygulamasında prolin içerikleri azaldığını belirlemişlerdir.

4.2.2.3. Elektrolit Sızıntısı (EC)

Uygulamaların mısır genotiplerinin EC değerlerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.5, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 de ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.3 'de verilmiştir.

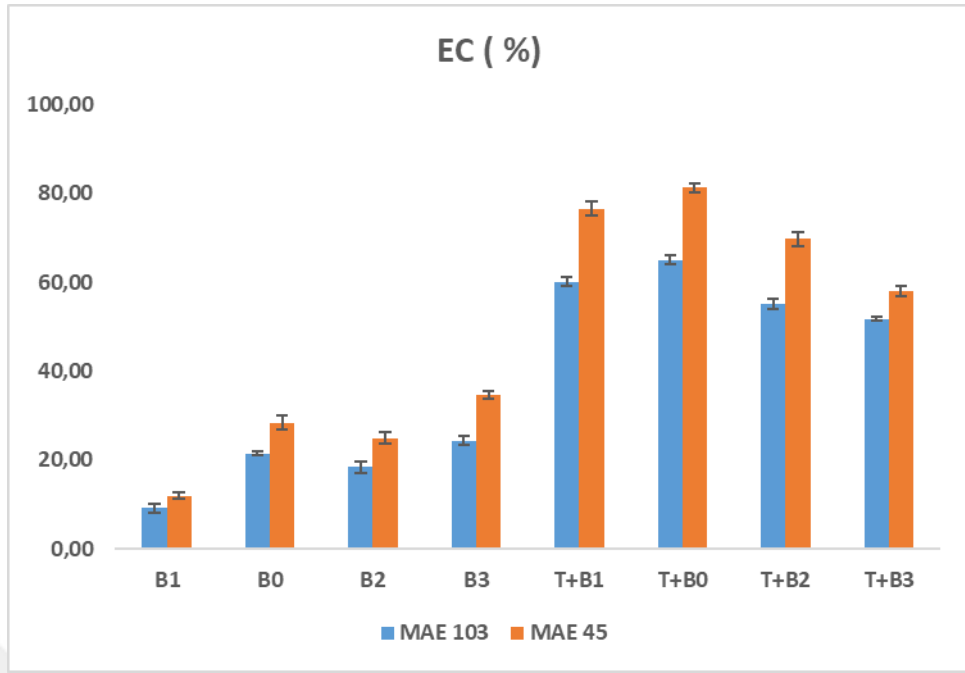
Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, EC değerleri üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.6).

Mısır genotiplerinin EC değerleri bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Bu artış MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre B0, B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %135 ile %138, %102 ile %109, %168 ile %190, %560 ile %541, %615 ile %580, %506 ile %483 ve %469 ile %385 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek EC değerleri GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotipinde sırasıyla %24.35 ve %34.60 olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. Her iki genotipte de B1'e göre (%9.09 ve %11.94) en fazla artışlar sırasıyla %168 ile %190 olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. MAE 45 genotipinde EC değerlerine ait yapılan LSD testine göre B0 ve B2 uygulamalarında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

Mısır genotiplerinin EC değerleri tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin EC değerleri T+B1'e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %8 ile %6 oranlarında artarken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %8 ile %9 ve %14 ile %24 oranlarında azalış gösterdiği belirlenmiştir.

En düşük EC değerleri GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (%51.77 ve %57.97) belirlenmiş olup T+B3 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde EC değerleri sırasıyla T+B1'e göre (%60.02 ve %76.51) en fazla azalmalar %14 ve %24 oranlarında belirlenmiş olup T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde EC değerleri LSD testine göre T+B0 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil.4.3. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotipinin EC değerleri üzerine etkisi

Elektrolit sızıntısı oksidatif hasarın göstergelerinden biri olduğunu belirlemişlerdir (Alharby ve ark., 2021). Bu tür değişimler, çoğunlukla ROT'ların üretimindeki artıştan ve özellikle ROT'lar arasında H₂O₂ birikiminden kaynaklanmaktadır (Apel ve Hirt, 2004). Tuz stresi koşullarında yetersiz B (T+B0) uygulamasında mısır genotiplerinin EC değerleri artarken, tuz stresi koşullarında yeterli B uygulamalarında (T+B2) azalmalar meydana geldiği belirlenmiştir. Tuz stresi bitkilerin sitozellerinde daha fazla oranda Na⁺ birikirken yetersiz B uygulaması ile hücre membranlarına zarar vererek daha fazla iyon sızıntısına neden olabilir. Bu durum T+B0 uygulamasında bu iki stres faktörü bir araya gelerek mısır genotiplerinin hücre membran yapısını bozulmasıyla daha fazla iyon sızıntısına neden olabilmektedir. Yetersiz bor, bitkide amino asitler ve lignin birikimine bağlı olarak kökün hücre duvarı kütlesinde kalınlaşmaya neden olmakta ve plazma membranının yapısının bozulduğunu bildirmişlerdir (García-Sánchez ve ark., 2020). Ancak bitkilerde T+B2 uygulaması H₂O₂ birikimini ve hücre membranlarındaki iyon sızıntısını azaltabilmektedir. Bunun yanında mısır genotiplerinin EC değerlerinde meydana gelen bu değişimler strese verdiği tepkileri ve genotipler arasındaki farklılıkları ortaya koyabilmektedir. Tuz stresi koşullarında mısır genotiplerinin EC değerlerindeki artış MAE 45 mısır genotipinde daha fazla oranlarda olmuştur. Uygulamalara bağlı olarak MAE 103 mısır genotipi MAE 45 mısır genotipine göre tuz stresi karşı daha fazla tolerans gösterebilmiştir. Tuza toleranslı ve hassas çeşitleri ayırt edebilmek için hücre zarı

stabilitesi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Dionísio-Sese ve Tobita, 1998). Çalışma sonuçlarımıza benzer olarak, plazma membranlarının tuz stresinden etkilenen ilk bölge olması nedeniyle elektrolit sızıntısı tuza toleranslı bitki seçiminde önemli bir kriterdir (Mansour ve Salama 2004; Ashraf ve Ali 2008). Tuz stresi koşullarında yeterli B uygulaması EC değerlerini azaltıcı yönde etki gösterdiği belirlenmiştir. Benzer olarak, sera koşullarında soya bitkisine (*Glycine max* L.) tuz dozları (75 ve 150 mM NaCl) ve 1mM B uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında kontrole göre EC değerleri sırasıyla %107 ve %131 oranında büyük bir artış göstermiştir. Tuz uygulaması ile tuzxbor interaksyonu karşılaştırıldığında soya bitkisinin tuz stresine göre EC değerleri sırasıyla %24 ve %22 oranlarında azaltıldığını belirlemişlerdir (Alharby ve ark., 2021). Ayrıca tuz stresi koşullarında mısır bitkisi artan tuz dozlarında (0, 100 ve 200 mM NaCl) bitkinin EC değerlerinde artışlar olduğu belirlenmiştir (Xiaozhou ve ark., 2020).

4.2.2.4. Lipid peroksidasyonu (MDA)

Uygulamaların mısır genotiplerinin MDA değerlerine ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.5, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 de ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.4 'de verilmiştir.

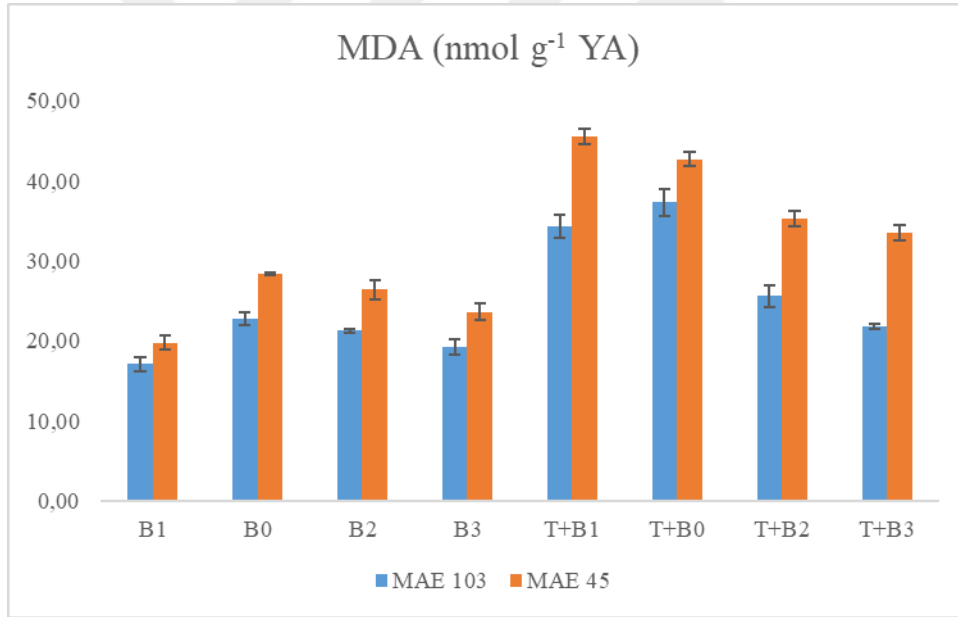
Uygulamaların GxTxB interaksyonuna etkileri incelendiğinde, MDA değerleri üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.6).

Mısır genotiplerinin MDA değerleri bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Bu artış MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre B0, B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %33 ile %44, %24 ile %34, %12 ile %20, %101 ile %130, %118 ile %116, %49 ile %78 ve %28 ile %69 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek MDA değerleri GxTxB interaksyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotipinde sırasıyla (22.75 nmol g⁻¹ YA ve 28.38 nmol g⁻¹ YA) olarak belirlenmiş olup yetersiz B uygulaması olan 0 mM B uygulaması (B0) ile elde edilmiştir. Her iki genotipte de B1'e göre (17.12 nmol g⁻¹ YA ve 19.76 nmol g⁻¹ YA) en fazla artışlar sırasıyla %33 ile %44 olup B0 uygulaması ile elde edilmiştir. MAE 45 genotipinde MDA değerlerine ait yapılan LSD testine göre B0 ve B2 uygulamalarında istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

Mısır genotiplerinin MDA değerleri tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin MDA değerleri T+B1'e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %9 oranında artarken %6 oranında azaldı; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %26 ile %23 ve %36 ile %26 oranlarında azalış gösterdiği belirlenmiştir.

En düşük MDA değeri GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde (22.75 nmol g⁻¹ YA) belirlenmiş olup T+B3 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde T+B1'e göre (34.36 nmol g⁻¹ YA) en fazla azalma %36 oranında belirlenmiş olup T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde MDA değerlerine ait yapılan LSD testine göre T+B1 ve T+B0 uygulamalarında arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmemiştir. MAE 45 genotipinde MDA değerlerine ait yapılan LSD testine göre T+B2 ve T+B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmemiştir.



Şekil.4.4. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotipinin MDA değerleri üzerine etkisi

Bitkilerde algılanan stres sonucunda meydana gelen oksidatif hasarın önemli bir göstergesi membran lipidlerinin peroksidasyonudur ve ortamdaki malondialdehit (MDA) miktarına göre tayin edilmektedir (Elstner ve Ossipow, 1984). Tez çalışmamda, tuz stresi koşullarında MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinde MDA miktarları diğer uygulamalara göre daha fazla artış gösterdiği belirlenmiştir. Tuz stresi

bitkinin hücre membranlarının yapılarının bozulmasıyla oksidatif hasarlanmalara neden olabilir. Oksidatif hasarlanmanın göstergesi olan MDA içeriği MAE 45 mısır genotipinin yapraklarında önemli düzeyde artış gösterirken, bu artış MAE 103 mısır genotipinde daha az düzeyde olmuştur. T+B1 ve T+B0 stres koşullarında iki stres faktörünün bir araya gelmesiyle bitkilerin hem ozmotik ve iyon dengesinin doğrudan etkilemekte olup su ve besin elementlerinin alımını engelleyebilmektedir. Çalışma sonuçlarımıza benzer olarak, yetersiz B ve tuz stresi koşullarında farklı bitki türlerinin MDA içeriklerinde önemli düzeyde artışlar olduğunu bildirmişlerdir (Perveen & Nazir, 2018; de Souza Júnior ve ark., 2022)

Tuz stresi koşullarında mısır genotiplerinin MDA içeriklerindeki artışı, ROT'un neden olduğu oksidatif hasarın bir sonucu olarak oluşur ve böylece hücre zarlarının bütünlüğünün bozulmasına neden olabilmektedir. Ancak tuz stresi koşullarında yeterli B uygulaması MDA içeriklerini azaltarak, bitkilerin stres koşullarına karşı geliştirdikleri savunma mekanizmalarının bir parçası olarak değerlendirilebilir. Bitkiler, bu tür stres koşullarına karşı çeşitli antioksidan enzimler ve diğer savunma bileşenleri üreterek tepki verebilirler. Bu savunma mekanizmaları oksidatif hasarlanmayı azaltmaya ve hücre zarlarının bütünlüğünü korumaya yardımcı olabilir. Tuz stresi koşullarında T+B2 uygulamaları MDA içeriğinde azaltıcı yönde etki gösterdiği belirlenmiştir. Tuz stresi koşullarında MAE 45 mısır genotipininin MDA içeriğindeki artış mısır genotipleri arasındaki farklılıkları ortaya koyabilmektedir. MDA içeriklerindeki bu artış stres durumunu ve toleransını değerlendirmek için kullanılan bir biyokimyasal parametre olabilir. Tuza dayanıklı olan MAE 103 mısır genotipi düşük MDA üretimiyle tuz stresini karşı tolerans sağlayabilmiştir. Araştırma bulgularımıza benzer olarak mısır genotiplerine BR5033 (tuza toleranslı) ve BR5011 (tuza hassas) kontrollü koşullarda tuz stresi (100 mM NaCl) uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında tuza hassas olan mısır genotipinde yaprak MDA değerleri tuza toleranslı olan mısır genotipine göre daha fazla artış olduğunu bildirmişlerdir (André ve ark., 2006). Çalışmamıza benzer olarak, kurak koşullar altında Dekalb-6525 (kuraklığa dayanıklı) ve Yousafwala-hybrid (kuraklığa hassas) mısır genotiplerine yapraktan B (0, 2, 4 ve 6 mg L⁻¹) dozlarının uygulanmıştır. Kurak koşullarda MDA içeriklerinde en fazla artış Yousafwala-hybrid mısır genotipinde olurken B uygulamalarıyla MDA içerikleri bitkilerde önemli düzeyde azalma gösterdiğini belirlemişlerdir (Naeem ve ark., 2018).

4.3. Reaktif Oksijen Türleri

4.3.1. Hidroksil radikali ($\cdot\text{OH}$) süpürülme aktivitesi

Uygulamaların mısır genotiplerinin hidroksil radikali ($\cdot\text{OH}$) süpürülme aktivitesine ait varyans analiz sonuçları Çizelge 4.5, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 de ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.4’de verilmiştir.

Uygulamaların GxTxB interaksyonuna etkileri incelendiğinde, hidroksil radikali ($\cdot\text{OH}$) süpürülme aktivitesine üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.5).

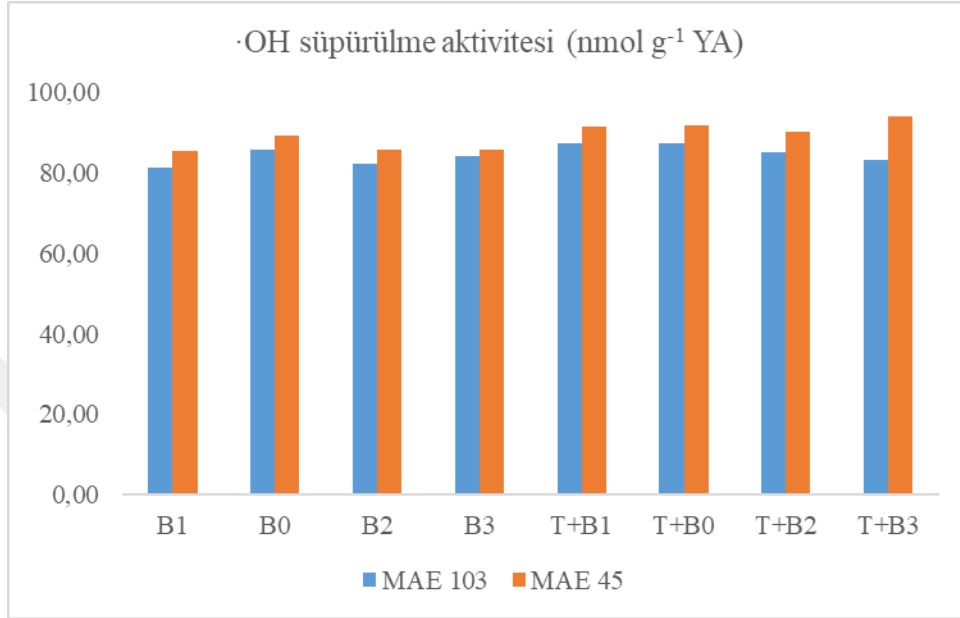
Mısır genotiplerinin $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Bu artış MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0, B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %5 ile %7, %1 ile %2, %3 ile %4, %7 ile %11, %9 ile %13, %5 ile %8 ve %2 ile %15 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi GxTxB interaksyonunda MAE 45 genotipinde (89.18 nmol g⁻¹ YA) olarak belirlenmiş olup yetersiz B uygulaması olan 0 mM B uygulaması (B0) ile elde edilmiştir. MAE 45 genotipinde B1’e göre (83.33 nmol g⁻¹ YA) en fazla artış %7 oranında olup B0 uygulaması ile elde edilmiştir. $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde B1 ve B2 uygulamalarından; MAE 45 genotipinde B1, B2 ve B3 uygulamalarından istatistiki bakımdan fark belirlenmemiştir.

Mısır genotiplerinin $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi T+B1’e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %1 ve %2 oranlarında artarken; T+B2 uygulamasında %3 ve %2 oranlarında azalırken; T+B3 uygulamasında %5 oranında azalma, %4 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En düşük $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi GxTxB interaksyonunda MAE 103 genotipinde (83.28 nmol g⁻¹ YA) belirlenmiş olup T+B3 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde T+B1’e göre (87.41 nmol g⁻¹ YA) en fazla azalma %5

oranında belirlenmiş olup T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesine ait yapılan LSD testine göre sırasıyla T+B0 ve T+B3 uygulamalarında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil.4.5. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin $\cdot\text{OH}$ süpürülme aktiviteleri üzerine etkisi

Mısır genotiplerinin $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi kontrole göre T+B1 ve T+B0 uygulamalarında sırasıyla %9 ve %11 oranlarında artarken bu artışın önemli düzeylerde olduğu belirlenmiştir. T+B1 ve T+B0 uygulamalarında $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesindeki artışlarda tuz stresi ve yetersiz B stres faktörünün bir araya gelmesiyle bitki yapraklarında ROT dengesinin bozulmasından kaynaklanabilir. Tuz stresi ve yetersiz B bitkilerde iyon kaybına ve ROT birikimine neden olduğunu belirlemişlerdir (Hossain ve Dietz, 2016; Hua ve ark., 2017). $\cdot\text{OH}$ radikali, H_2O_2 'deki O—O çift bağı ayrıldığında oluşabilmekte ve genellikle üretim yerinin çok yakınında hareket ettiğini belirlemişlerdir(Huang ve ark., 2019). Bu nedenle $\cdot\text{OH}$. radikali tüm biyolojik yapıli moleküller ile reaksiyona girebilir ve $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi artırarak reaktif radikalleri bitki hücresinden uzaklaştırabilir. Araştırmamızda tuz x bor interaksiyonunda mısır genotiplerinin $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi kontrole göre T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %7 ve %9 oranlarında artış göstermiştir. Tuz uygulaması ile tuz x bor interaksiyonu karşılaştırıldığında her iki mısır genotipinin $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi T+B1 göre T+B0 uygulamasında %2

oranında artarken; T+B2 uygulamasında %2 oranında azalırken, T+B3 uygulamasında önemli bir değişim olmadığı belirlenmiştir. Mısır genotiplerinde yetersiz B uygulamalarında $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi diğer bor uygulamalarına göre daha fazla oranlarda artış olduğu belirlenmiştir. Bor x genotip interaksiyonun önemli çıkması, $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesinde genotipleri arasındaki farklılıkları ortaya koymaktadır. Mısır genotiplerinin $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesi bor uygulamalarına bağlı olarak artarken B0 uygulamaları MAE 45 mısır genotipinde önemli düzeyde artış göstermiştir. Bulgularımıza paralel olarak, yetersiz B bitkinin yapraklarındaki serbest oksijen radikallerinin ($\cdot\text{OH}$.) birikimiyle membran fonksiyonlarını etkileyebilir (Çakmak ve Römheld 1997). Ayrıca plazma membranlarındaki su kanalları hidroksil radikalleri ($\cdot\text{OH}$) tarafından geri dönüşümlü olarak kapatıldığını bildirmişlerdir (Henzler ve ark.,2004). Mısır genotiplerine tuz stresi koşullarında T+B3 uygulamasında $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesine yardımcı olabilir. Ayrıca bor hücre duvarı sentezinde, yapısında ve bütünlüğünü koruma gibi işlevlere sahiptir. Bu durumda OH radikali, hücre duvarı polisakkaritlerini oksitleyerek hücre duvarının gevşemesine neden olabilir (Karkonen ve Kuchitsu., 2015). Bor, bitkilerde biyokimyasal ve fizyolojik reaksiyonu için önemli bir element olmasının yanında tatlı mısırdaki NaCl kaynaklı tuzluluğun olumsuz etkisini azalttığını bildirmişlerdir (Sezer ., 2014; Iqbal ve ark ., 2020). MAE 45 genotipi T+B3 uygulamasında $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesinde önemli düzeyde artış gösterdiği belirlenmiştir. $\cdot\text{OH}$ - süpürülme aktivitesindeki bu artış tuza dayanıksız ve bor toksisitesine hassas olan MAE 45 genotipinde daha fazla artış göstermiştir. Bitkilerde tuz stresinin neden olduğu oksidatif hasarlanmaların sonucu ROT üretiminde artış gösterebilmektedir. Ancak tuz stresi koşullarında yeterli B uygulaması OH- süpürülme aktivitesini ile ROT'u bitki hücresinden uzaklaştırılabilir. Tuzluluk bitkilerde daha fazla hasara neden olarak B toksisitesi altında oksidatif stresi artırabileceğini bildirmişlerdir (Eraslan ve ark., 2007). Tuz stresi ve toksik B hem apoplazmada hem de simplazmada çözünebilir B konsantrasyonunu artırır (Pandey ve ark., 2019). Bitkiler kuraklık, tuzluluk, sıcaklık, yetersiz B, iyon toksisitesi gibi abiyotik stres koşullarına maruz kaldığında reaktif oksijen türlerinin (ROT) üretimine neden olmaktadır (Hua ve ark, 2017;Samet ve Çıkılı, 2019). Bitkilerde ROT üretimi, fotosentez ve solunumdaki elektron taşıma işlemlerinin bozulmasıyla arttığını bildirmişlerdir (Foyer ve Hanke, 2022).

4.3.2. Hidrojen peroksit (H₂O₂) içeriği

Uygulamaların mısır genotiplerinin hidrojen peroksit (H₂O₂) içeriklerine aktivitesine ait varyans analiz Çizelge 4.5, elde edilen ortalama değeri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 de ve bu değeriye ait grafikler Şekil 4.6’da verilmiştir.

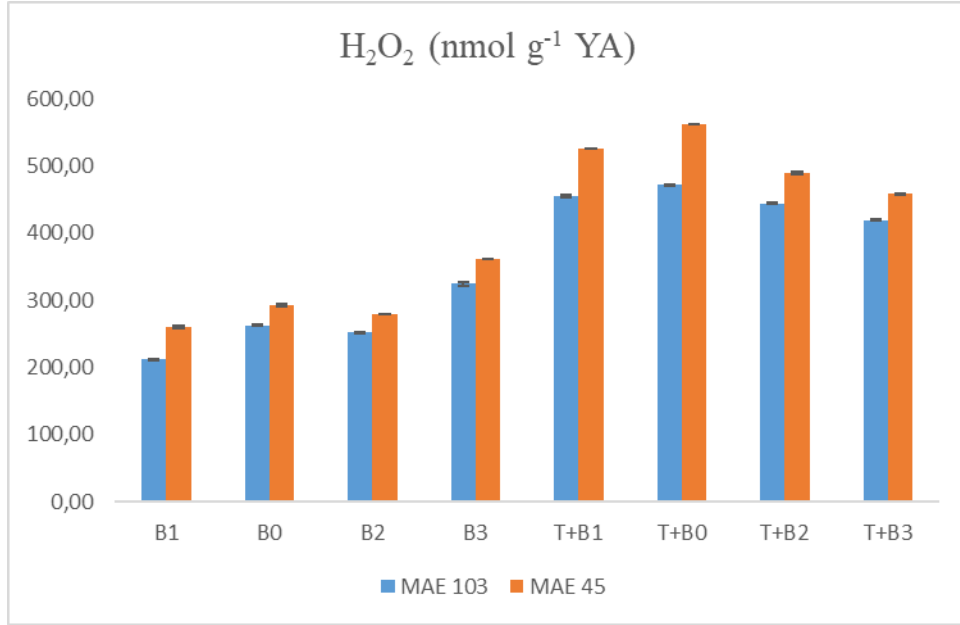
Uygulamaların GxTxB interaksyonuna etkileri incelendiğinde, hidrojen peroksit (H₂O₂) içeriklerine aktivitesine üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.5).

Mısır genotiplerinin H₂O₂ içerikleri bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değışmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Bu artış MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0, B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %24 ile %12, %19 ile %8, %53 ile %39, %115 ile %102, %123 ile %116, %110 ile %89 ve %98 ile %76 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek H₂O₂ içerikleri GxTxB interaksyonunda MAE 103 genotipinde (324.47 nmol g⁻¹ YA) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde B1’e göre (211.65 nmol g⁻¹ YA) en fazla artış %53 oranında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. H₂O₂ içeriklerine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin H₂O₂ içerikleri tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değışim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin H₂O₂ içerikleri T+B1’e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %4 ve %7 oranlarında artarken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %2 ile %7 oranlarında ve %8 ile %13 oranlarında azalma olduğu belirlenmiştir.

En düşük H₂O₂ içerikleri GxTxB interaksyonunda MAE 45 genotipinde (458.30 nmol g⁻¹ YA) belirlenmiş olup T+B3 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 45 genotipinde T+B1’e göre (525.59 nmol g⁻¹ YA) en fazla azalma %13 oranında belirlenmiş olup T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde H₂O₂ içerikleri ait yapılan LSD testine göre sırasıyla T+B0 uygulamasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil.4.6. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin H₂O₂ içerikleri üzerine etkisi

Mısır genotiplerinde H₂O₂ içerikleri bor uygulamalarına bağlı olarak artarken en fazla artış B3 uygulaması ile MAE 103 mısır genotipinde olmuştur. Mısır genotiplerinin H₂O₂ içeriklerinde meydana gelen bu artışlar genotipler arasındaki stresi tolere etme farklılıklarını ortaya koymaktadır. Ancak T+B2 ve T+B3 uygulamalarında H₂O₂ içeriklerinin azaltıcı yönde etkilerken, yetersiz B, antioksidan savunma sistemlerinin etkinliğini azaltarak H₂O₂ içeriklerinin artışına neden olabilir. T+B0 uygulamasındaki bu artışlarda iki stres faktörünün bir araya gelmesiyle bitki metabolizması için zararlı olan H₂O₂ içeriğinin daha fazla artmasına neden olabilir. Borun hücre duvarında ve hücre membranlarının stabilizesinde etkin olması, T+B0 uygulamasında iki stres faktörünün bir araya gelmesiyle hücre yapılarının bozulmasına, oksidatif hasarlanmalara ve ROT birikimlerine neden olabilir. Tuz stresi ve yetersiz B bitkilerde iyon kaybına, ROS birikimine, fotosentez aktivitesine, stoma iletkenliğine ve hücreler arası CO₂ değerlerinde azalmalar neden olduğunu belirlemişlerdir (Hossain ve Dietz, 2016; Hua ve ark., 2017). Bu durumda tuz stresi koşullarında yeterli B, T+B2 uygulaması H₂O₂ içeriklerini azaltarak bor stresini tolere edici yönde etkili olabilir. Çalışmamızda uygulamalara bağlı olarak MAE 45 genotipinin H₂O₂ içeriği MAE 103 mısır genotipine göre daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda MAE 45 mısır genotipinin tuz stresine daha dayanıksız olduğunun göstergesi olabilir.

Tuz stresi bitkilerin büyümesini ve fizyolojik özelliklerini kısıtlayan bir stres faktör olmasının yanında iyon toksisitesini oluşturmaktadır. Tuz stresinde iyon dengesinin bozulmasıyla ROT biri olan H₂O₂ içeriğini artırarak bitkilerde oksidatif strese neden olduğu belirlenmiştir. Tuz stresi koşullarında H₂O₂ içeriği MAE 45 mısır genotipinde önemli düzeyde artış göstererek MAE 103 mısır genotipine göre daha fazla oksidatif stresten etkilenebilir. Bu durum MAE 103 mısır genotipi H₂O₂ içeriği birikimini azaltarak tuz stresini tolerans sağlayabilir. Bitkilerde tuz stresi ROT üretimine neden olarak bitkilerde oksidatif strese ve organellerin yapılarına zarar verdiğini bildirmişlerdir (Zhou ve ark., 2024). Çalışmamıza benzer olarak, Hichem ve ark, (2009) sera koşullarında Arper (tuza toleranslı) ve Aristo (tuza hassas) yemlik mısır çeşitlerine artan tuz dozlarında 0, 34, 68 ve 102 mM NaCl uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında mısır çeşitlerinin H₂O₂ içeriği tuza hassas olan Aristo mısır çeşidinde daha yüksek oranlarda olduğunu belirlemişlerdir. Bulgularımıza paralel olarak, Esim ve ark, (2012) tarafından yetiştirme kabinde Zea mays L. cultivar (Arifiye-2) tohumlarına 2 mM B ve 4 mM B bor uygulanmıştır. Kontrole göre B uygulamalarının H₂O₂ içeriği 11. ve 15. günde mısır fidelerinde artış gösterdiği belirlenmiştir. Kontrol, 2 mM B ve 4 mM B konsantrasyonlarında, 11 günlük bitkilerde H₂O₂ içerikleri 16.1 nmol g⁻¹, 20.06 nmol g⁻¹ ve 21.4 nmol g⁻¹ ve 15 günlük olanlar 15.6 nmol g⁻¹, 18.4 nmol g⁻¹ ve 19.8 nmol g⁻¹ olduğu belirlenmiştir. Araştırmamıza benzer olarak, tuz stresi koşullarının hidrojen peroksit (H₂O₂) içeriğini artırdığını bildirmişlerdir (Konakci ve ark., 2020). Soya fasulyesi bitkilerinde ise tuz stresinin bitki dokularında H₂O₂ konsantrasyonunda güçlü bir artışa neden olduğunu göstermiştir (Farhangi-Abriz ve Nikpour-Rashidabad 2017).

4.4. Antioksidan Enzim Aktiviteleri

Uygulamaların mısır genotiplerinin SOD, POX, CAT, APX, GR, GSSG ve GSH antioksidan enzim aktivitelerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.9 ve 4.10'da ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Uygulamaların mısır genotiplerinin SOD, POX, CAT, APX, GR, GSSG ve GSH antiokisidan enzim aktivitelerine ait varyans analiz sonuçları

Kareler Ortalaması								
Uygulamalar	S.D	SOD	POX	CAT	APX	GR	GSSG	GSH
Genotip (G)	1	1294.03*	4312176*	328.07**	1083.61*	42612.39*		5746.03*
		*	*		*	*	1667.76**	*
Tuz Uyg. (T)	1	882.71**	92114**	146.01**	2930.43*	9032.60**	17728.36*	96.64**
					*		*	
Bor Uyg. (B)	3	89.14**	2698866*	443.54**	1009.25*	6921.03**	1251.41**	1981.51*
			*		*			*
GxT İnt.	1	37.89**		11.14**				
			48295**		91.60**	1876.86**	26.07**	121.80**
GxB İnt.	3	10.92**	44661**	18.59**	12.74**	1545.02**	6.66**	36.29**
TxB İnt.	3	138.89**	477548**	29.47**	87.92**	1277.11**	1055.79**	314.71**
GxTxB İnt.	3	38.90**		8.93**				
			13950**		61.42**	135.00**	6.70**	76.87**
Hata	32							
Genel	47							

Çizelge 4.8. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının MAE 103 mısır genotipinin SOD, POX, CAT, APX, GR, GSSG ve GSH değerleri üzerine etkisi

Uygulamalar	SOD			POX			CAT			APX			GR			GSSG			GSH		
	(Ünite mg ⁻¹ protein)			(Ünite mg ⁻¹ protein)			(Ünite mg ⁻¹ protein)			(Ünite mg ⁻¹ protein)			(Ünite mg ⁻¹ protein)			(nmol g ⁻¹ YA)			(nmol g ⁻¹ YA)		
	% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim		
B1	44.33d	-		4.16e	-		21.49c	-		1.82fg	-		1.87f	-		59.80g	-		300.68e	-	
B0	54.63b	23		4.11f	-1		20.01c	-7		1.72g	-6		1.53g	-18		118.68d	98		275.90g	-8	
B2	50.57c	14		5.12d	23		27.43b	28		2.12e	16		2.12c	13		92.13e	54		316.89c	5	
B3	56.02b	26		5.42c	30		28.29b	32		2.28d	25		2.47b	32		88.66f	48		322.21b	7	
T+B1	69.21a	56	-	3.91g	-6		22.02c	2	-	2.71c	48	-	2.04d	9	-	146.06a	144	-	292.73f	-3	-
T+B0	71.82a	62	-4	3.84h	-8	-4	20.15c	-6	-8	1.98ef	9	-27	1.95e	4	-5	148.24a	148	1	283.93f	-6	-3
T+B2	57.53b	30	-17	6.22a	50	55	34.29a	60	56	3.39a	86	25	3.26a	74	60	135.56b	127	-7	334.07a	11	14
T+B3	54.17b	22	-22	6.04b	45	50	35.77a	66	62	3.21b	76	19	3.21a	71	57	124.18c	108	-15	307.16d	2	5

Çizelge 4.9. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının MAE 45 mısır genotipinin SOD, POX, CAT, APX, GR, GSSG ve GSH değerleri üzerine etkisi

Uygulamalar	SOD			POX			CAT			APX			GR			GSSG			GSH		
	(Ünite mg ⁻¹ protein)			(Ünite mg ⁻¹ protein)			(Ünite mg ⁻¹ protein)			(Ünite mg ⁻¹ protein)			(Ünite mg ⁻¹ protein)			(nmol g ⁻¹ YA)			(nmol g ⁻¹ YA)		
	% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim		
B1	38.05f	-		3.43e	-		18.50d	-		1.52f	-		1,29e	-		73.35f	-		270.37d	-	
B0	45.18cd	19		3.02f	-12		17.04d	-8		1.18g	-23		1,07h	-18		132.26d	80		255.70e	-5	
B2	40.88ef	7		3.90d	14		22.59c	22		1.91d	26		1,35d	4		105.78e	44		277.66c	3	
B3	42.23de	11		4.18c	22		24.74b	34		2.10c	38		1,39c	7		102.23e	39		292.39b	8	
T+B1	51.24ab	35	-	2.93g	-15	-	18.56d	0	-	2.36b	55	-	1,27f	-2	-	160.39a	119	-	241.74f	-11	-
T+B0	52.12a	37	-2	2.14h	-37	-27	19.01d	3	2	1.65e	9	-30	1,25g	-4	-2	164.22a	124	2	236.42g	-13	-2
T+B2	48.57b	28	-5	5.07a	48	73	26.40ab	43	42	2.49a	63	5	1,86a	44	46	151.91b	107	-5	297.99a	10	23
T+B3	45.38c	19	-11	4.58b	33	56	27.43a	48	48	2.56a	68	9	1,64b	27	29	147.40c	101	-8	281.46c	4	16

Duncan testine göre küçük harfler aynı sütundaki ortalamalar arasındaki önemliliği ifade etmektedir.

4.4.1. Süperoksit dismutaz (SOD) enzim aktivitesi

Uygulamaların mısır genotiplerinin SOD aktivitelerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 da ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.7’de verilmiştir.

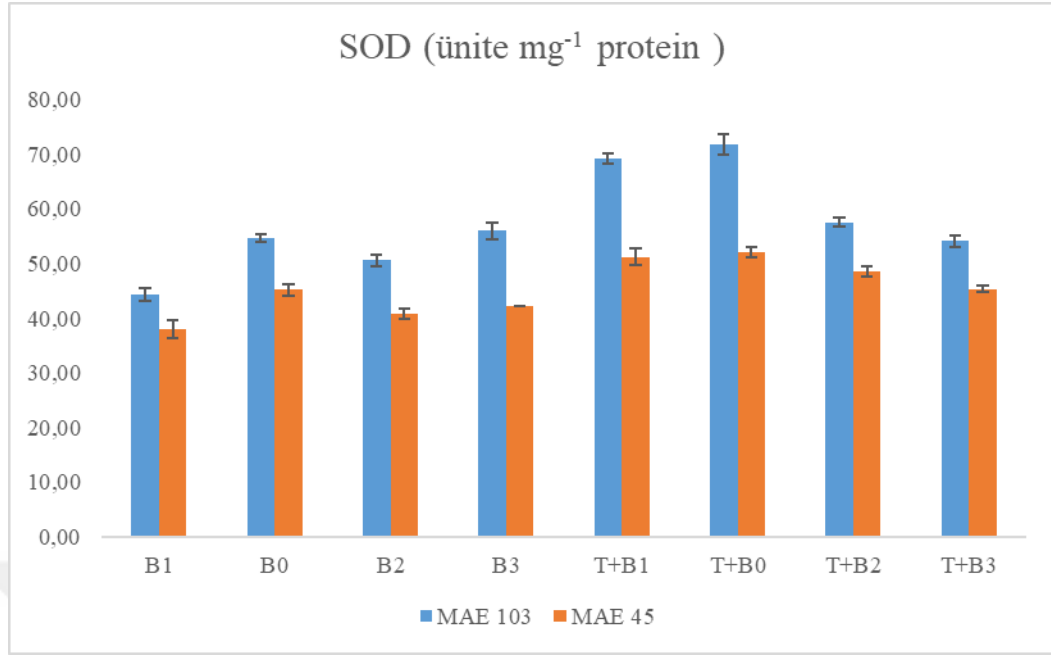
Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, SOD enzim aktivitesi üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.8).

Mısır genotiplerinin SOD aktivitesi bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Bu artış MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0, B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %23 ile %19, %14 ile %7, %26 ile %11, %56 ile %35, %62 ile %37, %30 ile %28 ve %22 ile %19 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek SOD aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde (56.02 ünite mg-1 protein) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde B1’e göre (44.33 ünite mg-1 protein) en fazla artış %26 oranında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. SOD aktivitesine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde B0 ve B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenirken; MAE 45 genotipinde uygulamalar arasında fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin SOD aktivitesi tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin SOD aktivitesi T+B1’e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %4 ve %2 oranlarında artarken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %17 ile %5 oranlarında ve %22 ile %19 oranlarında azalma olduğu belirlenmiştir.

En düşük SOD aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde (54.17 ünite mg-1 protein) belirlenmiş olup T+B3 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde T+B1’e göre (69.21 ünite mg-1 protein) en fazla azalma %22 oranında belirlenmiş olup T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde SOD aktivitesine ait yapılan LSD testine göre sırasıyla T+B1 ve T+B0 uygulamalarında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.



Şekil.4.7. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin SOD enzim aktivitesi üzerine etkisi

Stres koşullarında ve özellikle tuz stresinde bitkide iyon toksisitesi, ozmotik stres, lipid peroksidasyonu, elektrolit sızıntısı ve H₂O₂ birikimiyle ROT artması hücrede oksidatif hasarlanmaya neden olabilmektedir. Bitkiler bu oksidatif hasarlanmayla başa çıkabilmek ve ROT hücreden uzaklaştırabilmek için enzimatik ve enzimatik olmayan antioksidan savunma mekanizmaları geliştirmişlerdir. Bitki hücresinde ROT üretimi ve hücreden uzaklaştırılması bir denge halinde olmasının yanında SOD enzimi antioksidan savunma mekanizmasının en önemli enzimlerinden biridir. SOD, bitki hücresinde ROT üretimine karşı antioksidan savunma sisteminin en etkili bileşenlerinden olup O₂⁻’nin O₂ ve H₂O₂’ye dönüşümünü katalize eden bir metaloenzimdir (Mishra ve ark., 2023). Çalışmamızda MAE 103 mısır genotipi tuz stres koşullarında (T+B1) ve bu koşullarda yetersiz bor (T+B0) uygulamasında SOD enzim aktivitesi diğer uygulamalara göre daha fazla artış göstererek istatistik bakımından önemli olduğu belirlenmiştir. Stres koşullarında (T+B1 ve T+B0) önemli miktardaki süperoksit (O₂⁻) radikalinin birikmesine ve bitki hücresinde hasarlanmaya neden olabilir. Bu durum hücre hasarlanmalarıyla ROT birikimlerine ve hücre içerisinde zararlı serbest radikallerden olan O₂⁻, .OH ve H₂O₂ içeriklerini artırmaktadır. Ancak T+B2 uygulamalarında bu içeriklerin azalmasıyla hücre hasarını engelleyebilir. Çalışmamızda uygulamalara bağlı olarak göre MAE 103 genotipinin SOD aktivitesi MAE 45 genotipine göre daha yüksek oranlarda olduğu tespit

edilmiştir. Ayrıca MAE 103 mısır genotipinin tuza dayanıklı ve bor toksisitesine toleranslı olması özelliği sayesinde daha yüksek SOD aktivitesine sahip olabileceğini göstermektedir. MAE 103 mısır genotipinin H₂O₂ içeriği ve OH. süpürülme aktiviteleri MAE 45 mısır genotipine göre daha az oranda olmuştur. MAE 45 mısır genotipinin H₂O₂ içeriğinin artması O₂ biriktirmesiyle enzim aktivitesinin azalmasına ve antioksidan savunma mekanizmasına zarar vererek tuz stresine karşı tolerans gösteremeyebilir. Ayrıca SOD enzimi Cu/Zn-SOD, Fe-SOD ve Mn- SOD olmak üzere üç ana tipe ayrılarak O[•]-2 'yi H₂'ye dönüştürerek antioksidan savunma sistemine öncülük etme özelliğine sahip olması nedeniyle MAE 103 mısır genotipinde stres koşullarında O[•]-2 ve OH. oluşması olasılığını azaltarak antioksidan savunma sisteminde dengeyi sağlayabilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalara benzer olarak, SOD enzim aktivitesi stres koşullarında farklı bitki çeşitlerinde artış gösterdiği belirlenmiştir (Tavallali, Karimi ve Espargham, 2018; Wang ve ark., 2022) SOD enzimi tarafından üretilen H₂O₂ daha sonra CAT ve çeşitli peroksidaz sınıfları tarafından temizlenir. Peroksizomlarda, sitozolde ve mitokondride bulunan CAT, H₂O₂'yi H₂O ve O₂'ye dönüştürür (McKersie ve Leshem, 1994). Peroksidazlar (APX ve GPX) hücre boyunca dağılır ve H₂O₂'nin H₂O'ya indirgenmesini katalize eder (André ve ark., 2006)

Tuza toleranslı olan mısırın SOD enzim aktivitesi ve H₂O₂ gibi serbest radikalleri ortadan kaldırmada tuza hassas olan mısırdan daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir (Cai ve ark.,2019). Bulgularımıza paralel olarak, Hamurcu ve ark, (2020) tarafından su kültürü ortamında iki farklı hibrit mısır çeşidine (bor toleranslı RX 770 ve bor duyarlı TTM 8119) farklı B dozlarında (0, 2.5, 25 ve 50 ppm B) bitkinin gelişimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada artan bor dozlarına bağlı olarak bitkinin SOD enzim aktivitesi artış göstermiştir. TTM 8119'da mısır çeşidinde B dozlarında sırasıyla SOD enzim aktivitesi %22, %27 ve % 35 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. Araştırmamıza benzer olarak, Khalil (2011) hidroponik bir sistemde mısır genotiplerine (EV78 , R-2303, KS-64 ve R-2315) bor uygulamaları (0.05 mM B, 2.5 mM B ve 5 mM B) ve tuz stresi (75 mM NaCl) uygulandı. Mısır genotiplerinde SOD enzim aktivitesi kontrole göre tuz stresi koşullarında artış gösterdiği belirlenmiştir. Tuz stresi koşullarında bor uygulamalarında SOD enzim aktivitesinde azalmalar olduğunu bildirmişlerdir.

4.4.2. Peroksidaz (POX) enzim aktiviteleri

Uygulamaların mısır genotiplerinin POX aktivitelerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 da ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.8’de verilmiştir.

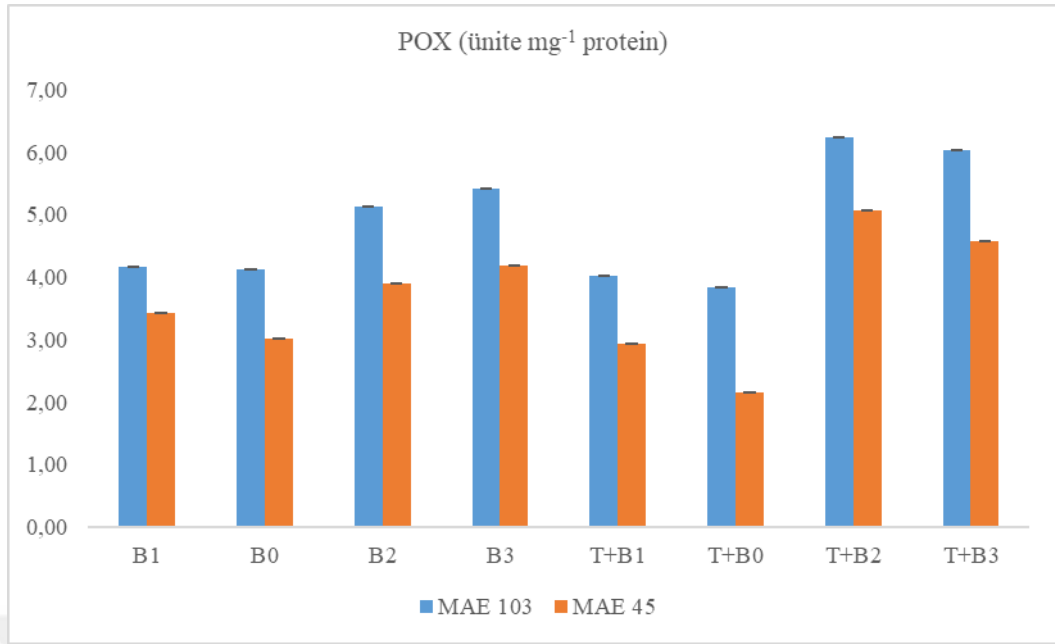
Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, POX aktivitesi üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.8).

Mısır genotiplerinin POX aktivitesi bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Ancak MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0, T+B1 ve T+B0 uygulamalarında sırasıyla %1 ile %12, %6 ile %15, %8 ile %37 oranlarında azalırken; B2, B3, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %23 ile %14, %30 ile %22, %50 ile %48 ve %45 ile %33 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek POX aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde (5.42 ünite mg-1 protein) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde B1’e göre (4.16 ünite mg-1 protein) en fazla artış %30 oranında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. POX aktivitesine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin POX aktivitesi tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin POX aktivitesi T+B1’e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %4 ve %27 oranlarında azalırken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %55 ile %73 oranlarında ve %50 ile %33 oranlarında artış olduğu belirlenmiştir.

En yüksek POX aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (6.22 ünite mg-1 protein ve 5.07 ünite mg-1 protein) belirlenmiş olup T+B2 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1’e göre (3.91 ünite mg-1 protein ve 2.93 ünite mg-1 protein) en fazla artışlar %55 ve %73 oranlarında belirlenmiş olup T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde POX aktivitesine ait yapılan LSD testine göre sırasıyla T+B2 uygulamasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil.4.8. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin POX enzim aktivitesi üzerine etkisi

Peroksidazlar (POX), endoplazmik retikulum ile golgi aygıtı yoluyla sentezlenerek hücre dışı boşluğa veya vakuollere salgılanmasına yol açan glikoprotein olup H₂O₂'nin hücreden uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Rajput ve ark., 2021). Mısır genotiplerinde POX aktivitesi bor uygulamalarına bağlı olarak artarken en fazla artış B3 uygulaması ile MAE 103 mısır genotipinde olmuştur. Tuz stresi koşullarında her iki mısır genotipinin POX aktivitesi azalırken, T+B2 uygulamasında önemli düzeyde artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum mısır genotiplerinde T+B2 uygulaması POX aktivitesindeki artış ile tuz stresine karşı koruma sağlayabilmiştir. POX enzimi, SOD enziminin O₂^{•-} radikallerini süpürmesi sonucunda ortaya çıkan H₂O₂'in kloroplastlarda süpürülmesinde rol oynayan önemli enzimlerden biridir (Asada ve Takahashi, 1987). Mısır genotiplerinin tuz stresi koşullarında artan H₂O₂ içerikleri azaltabilmek için antioksidan enzimler görev almaktadır. Mısır genotiplerinin H₂O₂ içerikleri T+B1 ve T+B0 uygulamalarında artarken POX aktivitesinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. Ancak T+B2 ve T+B3 uygulamalarında H₂O₂ içerikleri azalırken POX aktivitesi artış göstererek H₂O₂ hücrelerden uzaklaştırabilmiştir. Tuz stresi, hücrel elektron taşıma sisteminin bozulmasına ve ROT (1O₂⁻, O₂⁻, H₂O₂ ve OH⁻) oluşumlarına neden olduğunu bildirmişlerdir (Hameed ve ark., 2021). POX enzimi, H₂O₂ oksidasyonunda substrat olarak bir elektronu H₂O₂'den uzaklaştırmak için kullanan enzimlerdendir. Bu nedenle MAE 103 mısır genotipinin daha yüksek POX enzim

aktivitesine sahip olması tuza toleranslı olabileceğini göstermektedir. Bitkilerde tuz toleransında H₂O₂ süpürücü enzimler arasında POX enziminin olduğunu bildirmişlerdir (Liu ve ark., 2017). Tuza dayanıklı kendilenmiş mısır hattında (L87) daha yüksek POX enzim aktivitesi olduğunu belirlemişlerdir (Wang ve ark., 2019). Ayrıca bitkilerde bor hücre membran metabolizmasında ve enzim reaksiyonlarının iyonlarında görev almaktadır (Blevins ve Lukaszewski, 1998; Goldbach ve Wimmer, 2007) Hücrede borun neden olduğu değişiklikler iyon taşınması ve zarla ilgili süreçleri etkilemekte olup plazma zarının stabilitesini korunmasında önemli role sahiptir (Cakmak ve ark., 1995; Bonilla ve ark., 2004). Bulgularımıza paralel olarak, Hamurcu ve ark (2020) tarafından su kültürü ortamında iki farklı hibrit mısır çeşidine (bor toleranslı RX 770 ve bor duyarlı TTM 8119) farklı B dozlarında (0, 2.5, 25 ve 50 ppm B) bitkinin gelişimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada artan bor dozları 5.günde RX 770'de mısır çeşidinde POX enzim aktivitesi kontrole göre %16, %12 ve %20; 2.5 mg L⁻¹ B dozunda %5 artarken, TTM8119'da sırasıyla 25 ve 50 mg L⁻¹ B dozunda %19 ve %35 azalmıştır. 10. günde RX 770'de 2.5 ve 50 mg L⁻¹ B dozunda sırasıyla %14 ve %5 oranında önemli ölçüde azalırken, 50 mg L⁻¹ B dozunda %13 oranında artış olduğunu belirlemişlerdir.

Araştırma bulgularımıza benzer olarak, iki hibrit mısır çeşit (Sancia ve Agrister) farklı tuz seviyelerinde (0, 2, 4 ve 6 g NaCl L⁻¹) altında sera koşullarında yetiştirilmiştir. POX antioksidan enzimi kontrole göre tuz stresinde Agrister çeşidi artış gösterirken, Sancia çeşidi POX enziminde azalma gösterdiği belirlenmiştir. Agrister mısır çeşidi Sancia mısır çeşidine göre tuza daha toleranslı olduğunu bildirmişlerdir (Kthiri ve ark., 2022). Naeem ve ark. (2017), kurak koşullar altında Dekalb-6525 (kuraklığa dayanıklı) ve Yousafwala-hybrid (kuraklığa hassas) mısır genotiplerine yapraktan B (0. 2. 4 ve 6 mg L⁻¹) dozlarının uygulanmıştır. Kurak koşullarda B uygulamalarıyla POX enzim aktivitesi Yousafwala-hybrid genotipine göre DK-6525 genotipinde daha fazla artış gösterdiğini belirlemişlerdir. B, bitkilerde biyokimyasal ve fizyolojik reaksiyonu için önemli bir element olmasının yanında NaCl kaynaklı tuzluluğun olumsuz etkisini azaltığını bildirmişlerdir (Iqbal ve ark ., 2020).

4.4.3. Katalaz (CAT) enzim aktiviteleri

Uygulamaların mısır genotiplerinin CAT aktivitelerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 da ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.9'da verilmiştir.

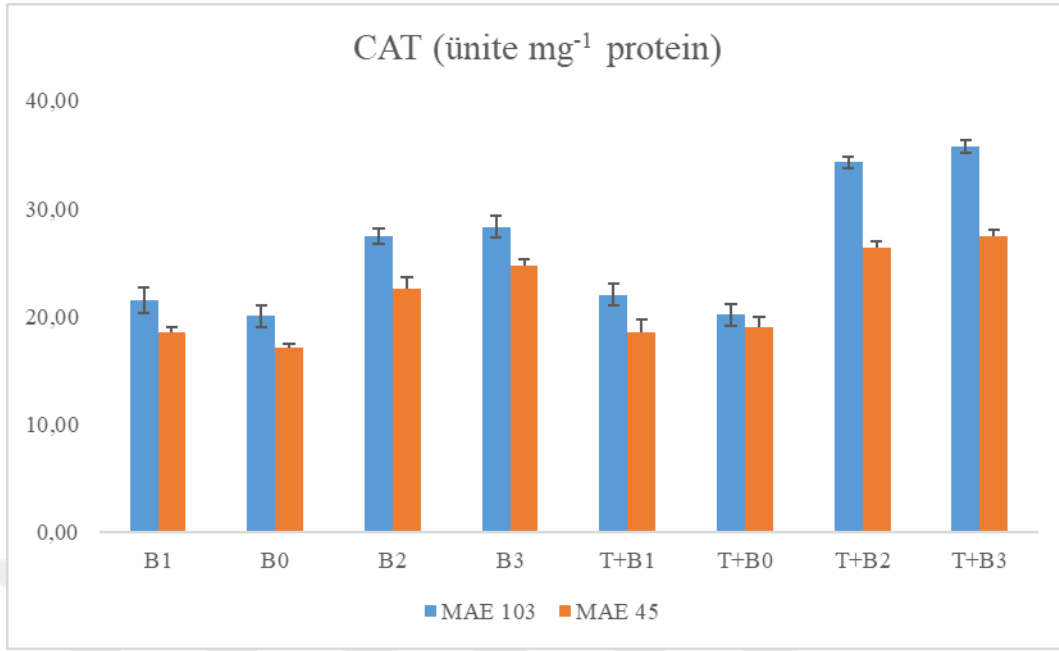
Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, CAT enzim aktivitesi üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.8).

Mısır genotiplerinin CAT enzim aktivitesi bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Ancak MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre B0 uygulamasında sırasıyla %7 ile %8 oranında azalırken; B2, B3, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %28 ile %22, %32 ile %34, %2 ile %0, %60 ile %43 ve %66 ile %48 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 genotipinde B1'e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %6 oranında azalırken; MAE 45 genotipinde %2 oranında artış olmuştur.

En yüksek CAT aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotipinde (28.29 ünite mg-1 protein ve 24.74 ünite mg-1 protein) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde B1'e göre (21.49 ünite mg-1 protein ve 18.50 ünite mg-1 protein) en fazla artış %32 ve %34 oranlarında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde CAT aktivitesine ait yapılan LSD testine göre B1 ve B0 uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin CAT aktivitesi tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 genotipinde CAT aktivitesi T+B1'e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %8 oranında azalırken, MAE 45 genotipinde % 3 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %56 ile %42 oranlarında ve %62 ile %48 oranlarında artış olduğu belirlenmiştir.

En yüksek CAT aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (35.77 ünite mg-1 protein ve 27.43 ünite mg-1 protein) belirlenmiş olup T+B3 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1'e göre (22.02 ünite mg-1 protein ve 18.56 ünite mg-1 protein) en fazla artışlar %62 ve %48 oranlarında belirlenmiş olup T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde CAT aktivitesine ait yapılan LSD testine göre sırasıyla T+B2 ve T+B3 uygulamalarında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.



Şekil.4.9. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin CAT enzim aktivitesi üzerine etkisi

Katalazlar (CAT), peroksizomlarda lokalize olup H₂O₂'yi O₂ ve H₂O'ya dönüştüren tetramerik hem içeren enzimlerdir. CAT enzimi H₂O₂'yi doğrudan değiştirebilen ve stres durumunda ROT'un hücreden uzaklaştıran antioksidan enzimlerdendir (Khan ve Khan, 2017). Mısır genotiplerinde CAT aktivitesi bor uygulamalarına bağlı olarak artarken en fazla artış B3 uygulaması ile MAE 103 mısır genotipinde olmuştur. Ayrıca tuz stresi koşullarında toksik B olan T+B3 uygulamasında CAT aktivitesi artış gösterdiği belirlenmiştir. Bitkiler tuz stresi koşullarında ROT türlerinden olan H₂O₂ içeriğinin artmasıyla bitki hücrelerine zarar verebilmektedir. CAT enzimi bitki hücrelerinde artan bu H₂O₂ birikimini azaltabilmek için aktivitesini artırarak bitki hücrelerinden uzaklaştırabilir. CAT enzimi, H₂O₂'yi doğrudan H₂O ve O₂'ye dönüştürdüğü için ROT mücadele etmeye yardımcı olan tetramerik bir proteindir (Kumar ve ark.. 2018). Çalışmamızda mısır genotiplerinin CAT enzim aktivitesi T+B2 uygulamalarında artış göstererek H₂O₂ radikalini etkini azaltabilir. Uygulamalara bağlı olarak MAE 103 genotipinin CAT enzim aktivitesi MAE 45 genotipine göre daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmiştir. MAE 103 mısır genotipinin daha yüksek CAT enzim aktivitesi göstererek hücreden daha fazla H₂O₂ uzaklaştırarak tuz stresine karşı tolerans gösterebilmektedir. Daha önceki çalışmalarda, B uygulamaları bitkinin büyümesini düzenleyerek, hücrenin yapısal bütünlüğünü ve stabilitesini iyileştirerek antioksidan

savunma sistemlerini güçlendirerek bitkinin stres direncini artırabileceğini bildirmişlerdir (Yousefi ve ark., 2020). Bitkilerde bor hücre membran metabolizmasında ve enzim reaksiyonlarının iyonlarında görev almaktadır (Blevins ve Lukaszewski. 1998; Goldbach ve Wimmer. 2007) Hücrede borun neden olduğu değişiklikler iyon taşınması ve zarla ilgili süreçleri etkilemekte olup plazma zarının stabilitesini korunmasında önemli role sahiptir (Cakmak ve ark.. 1995; Bonilla ve ark.. 2004). Çalışmamıza benzer olarak, Wang ve ark (2019) tuz stresi koşullarında tuza toleranslı mısır genotipinde daha yüksek CAT enzim aktivitesi göstererek daha düşük seviyelerde ROT biriktirdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca üç mısır (*Zea mays* L.) çeşidine (SC 129, SC 13 ve SC 155) yetiştirme kabinde farklı tuz dozlarında (50,100 ve 200 mM NaCl) saksılarda bitkilere uygulanmıştır. Mısır çeşitlerinde tuza toleranslı olan SC 129 ve SC 13 mısır çeşitlerinde artış olduğunu bildirmişlerdir (Azooz ve ark.. 2009).

Araştırmamıza benzer olarak, Naeem ve ark (2017) kurak koşullar altında Dekalb-6525 (kuraklığa dayanıklı) ve Yousafwala-hybrid (kuraklığa hassas) mısır genotiplerine yapraktan B (0, 2, 4 ve 6 mg L⁻¹) dozlarının uygulanmıştır. Kurak koşullarda B uygulamalarıyla CAT enzim aktivitesi Yousafwala-hybrid genotipine göre DK-6525 genotipinde daha fazla artış gösterdiğini belirlemişlerdir.

Bulgularımıza paralel olarak, Hamurcu ve ark (2020) tarafından su kültürü ortamında iki farklı hibrit mısır çeşidine (bor toleranslı RX 770 ve bor duyarlı TTM 8119) farklı B dozlarında (0. 2.5. 25 ve 50 mg L⁻¹ B) bitkinin gelişimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada artan bor dozları 5.günde RX 770'de mısır çeşitlerinde CAT enzim aktivitesi kontrole göre %16. %12 ve %20; 2.5 mg L⁻¹ B dozunda %5 artarken. TTM8119'da sırasıyla 25 ve 50 mg L⁻¹ B dozunda %19 ve %35 azalmıştır. 10. günde RX 770'de 2.5 ve 50 mg L⁻¹ B dozunda sırasıyla %14 ve %5 oranında önemli ölçüde azalırken, 50 mg L⁻¹ B dozunda %13 oranında arttığını belirlemişlerdir.

4.4.4. Askorbat peroksidaz (APX) enzim aktiviteleri

Uygulamaların mısır genotiplerinin APX aktivitelerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 da ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.10'da verilmiştir.

Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, APX enzim aktivitesi üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur

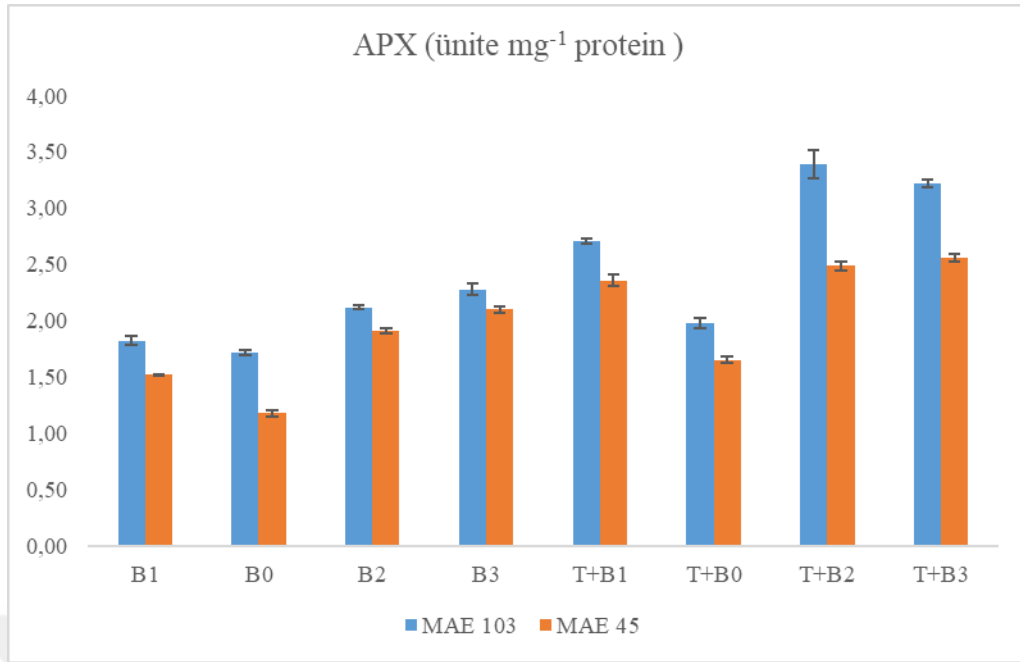
(Çizelge 4.8).

Mısır genotiplerinin APX enzim aktivitesi bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Ancak MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre B0 uygulamasında %6 ile %23 oranlarında azalırken; B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %16 ile %26, %25 ile %38, %48 ile %55, %9 , %86 ile %63 ve %76 ile %68 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek APX aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (2.28 ünite mg-1 protein ve 2.10 ünite mg-1 protein) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre (1.82 ünite mg-1 protein ve 1.52 ünite mg-1 protein) en fazla artış %25 ve %38 oranlarında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. APX aktivitesine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin APX aktivitesi tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin APX aktivitesi T+B1'e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %27 ve %30 oranlarında azalırken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %25 ile %5 oranlarında ve %19 ile %9 oranlarında artış olduğu belirlenmiştir.

En yüksek APX aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde (3.39 ünite mg-1 protein) belirlenmiş olup T+B2 uygulamasından; MAE 45 genotipinde (2.56 ünite mg-1 protein) belirlenmiş olup T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde sırayla T+B1'e göre (2.71 ünite mg-1 protein ve 2.36 ünite mg-1 protein) en fazla artışlar %25 ve %9 oranlarında belirlenmiş olup T+B2 ve T+B3 uygulamalarından elde edilmiştir. APX aktivitesine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde T+B2 uygulamasında istatistiki bakımdan fark bulunurken; MAE 45 genotipinde T+B2 ve T+B3 uygulamalarında istatistiki bakımdan fark bulunmadığı belirlenmiştir.



Şekil.4.10. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin APX enzim aktivitesi üzerine etkisi

Askorbat peroksidaz (APX), bitkilerde kloroplast, peroksizomlar, sitozol, mitokondri ve apoplastlarda rol alarak H_2O_2 'yi H_2O dönüşümünü sağlayan en önemli peroksidazlardandır (Hasanuzzaman ve ark.,2020). Mısır genotiplerinde APX aktivitesi bor uygulamalarına bağlı olarak artarken en fazla artış B3 uygulaması ile MAE 103 mısır genotipinde olmuştur. Tuz stresi koşullarında her iki mısır genotipinin APX aktivitesi artarken, T+B2 uygulamasında önemli düzeyde artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum mısır genotiplerinde tuz stresi koşullarında yeterli B olan T+B2 uygulaması APX aktivitesinde artış sağlayarak tuz stresine karşı koruma sağlayabilmiştir. Tuz stresi koşullarında oksidatif stresi azaltmak için antioksidan savunma sisteminin olan APX enzimi hücreler boyunca dağılarak üretilen H_2O_2 'yi H_2O dönüşmesini sağlayan bir enzimdir. Çalışmamızda tuz stresi koşullarında mısır genotiplerinin H_2O_2 içeriklerinde artış göstermiştir. Bu durum APX enzimi bitki hücrelerinde oluşan bu H_2O_2 birikimini azaltabilmek için aktivitesini artırabilir. APX enzimi, H_2O_2 suya dönüşümü bir elektron donörü olarak askorbatı kullanır (Rajput ve ark., 2021). APX, askorbat-glutasyon döngüsünün ilk adımında elektron donörü olarak askorbat kullanır ve H_2O_2 detoksifikasyonunda en önemli bitki peroksidaz olarak kabul edilir (Noctor and Foyer, 1998). Çalışmamızda, tuz stresi koşullarında APX aktivitesini artırarak tuz stresi tolerans sağlayabilmiştir. T+B1 ve T+B0 uygulamalarında H_2O_2 birikiminde artışlar olurken, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında APX enzim aktivitesini artırarak H_2O_2 birikimini

azaltabilir. Ayrıca tuz stresi koşullarında bor uygulamaları H₂O₂ birikimini azaltarak tuz stresinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmaya yardımcı olabilir. Bitkilerde tuz stresi ve yetersiz B koşullarında iyonik dengenin bozulmasıyla daha fazla ROT üretimine ve H₂O₂ birikimine neden olduğu belirlenmiştir. APX, H₂O₂'nin O₂ ve H₂O'ya dönüşümüne yardımcı olan bir antioksidandır. Çalışmamızda mısır genotiplerinin APX enzim aktivitesi T+B0 uygulamalarında azalırken T+B2 ve T+B3 uygulamalarında artış göstererek H₂O₂ radikalini etkisini azaltabilir. Uygulamalara bağlı olarak MAE 103 genotipinin APX enzim aktivitesi MAE 45 genotipine göre daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmiştir. MAE 103 mısır genotipinin APX enzim aktivitesindeki artış göstermesi tuz stresine karşı tolerans sağlayabilir. Tuz stresi koşullarında tuza toleranslı kendilenmiş mısır hattında APX enzim aktivitesi hassas olan mısır genotipine göre daha fazla artış gösterdiğini belirlemişlerdir (Wang ve ark., 2019). Ayrıca B uygulamalarına bağlı olarak genotiplerin B toleransındaki farklılıklarını ortaya koymuştur. Bitkilerde bor hücre membran metabolizmasında ve enzim reaksiyonlarının iyonlarında görev almaktadır (Blevins ve Lukaszewski, 1998; Goldbach ve Wimmer, 2007). Bulgularımıza paralel olarak, Hamurcu ve ark (2020) tarafından su kültürü ortamında iki farklı hibrit mısır çeşidine (bor toleranslı RX 770 ve bor duyarlı TTM 8119) farklı B dozlarında (0, 2.5, 25 ve 50 ppm B) bitkinin gelişimi üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada artan bor dozlarında APX enzim aktivitesi kontrole göre RX 770'de mısır çeşidinde %28. %91 ve %135 oranlarında. TTM 8119 çeşidinde %30. %91 ve %95 oranında önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca üç mısır (*Zea mays* L.) çeşidine (SC 129, SC 13 ve SC 155) yetiştirme kabinde farklı tuz dozlarında (50,100 ve 200 mM NaCl) saksılarda bitkilere uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında APX enzim aktivitesi tuza toleranslı olan SC129 ile SC13 mısır çeşitlerinde ve tuza hassas olan C155 çeşidinde APX enzim aktivitesini arttırdığını bildirmişlerdir (Azooz ve ark., 2009). Araştırmamıza benzer olarak, Naeem ve ark (2017) kurak koşullar altında Dekalb-6525 (kuraklığa dayanıklı) ve Yousafwala-hybrid (kuraklığa hassas) mısır genotiplerine yapraktan B (0, 2, 4 ve 6 mg L⁻¹) dozlarının uygulanmıştır. Kurak koşullarda B uygulamalarıyla APX enzim aktivitesi Yousafwala-hybrid genotipine göre DK-6525 genotipinde %44 oranında artış gösterdiğini belirlemişlerdir.

4.4.5. Glutasyon Redüktaz (GR) enzim aktiviteleri

Uygulamaların mısır genotiplerinin GR aktivitelerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 da ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.11’da verilmiştir.

Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, GR aktivitesi üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.8).

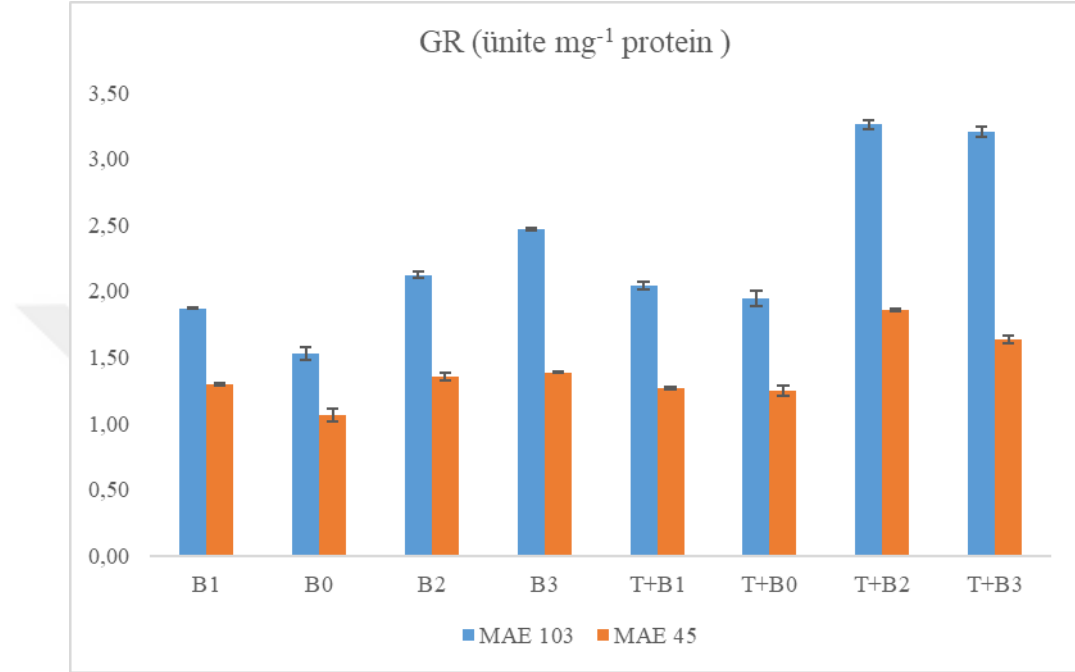
Mısır genotiplerinin GR aktivitesi bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0 uygulamasında %18 oranında azalırken; B2, B3, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %13 ile %4, %32 ile %7, %74 ile %44 ve %71 ile %27 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak T+B1 ve T+B0 uygulamalarında MAE 103 genotipinde %9 ile %4 oranlarında artarken, MAE 45 genotipinde %2 ile %4 oranlarında azalmalar olduğu belirlenmiştir.

En yüksek GR aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (2.47 ünite mg-1 protein ve 1.39 ünite mg-1 protein) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre (1.87 ünite mg-1 protein ve 1.29 ünite mg-1 protein) en fazla artış %32 ve %7 oranlarında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. GR aktivitesine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin GR aktivitesi tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin GR aktivitesi T+B1’e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %5 ve %2 oranlarında azalırken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %60 ile %46 oranlarında ve %57 ile %29 oranlarında artış olduğu belirlenmiştir.

En yüksek GR aktivitesi GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (3.26 ünite mg-1 protein ve 1.86 ünite mg-1 protein) belirlenmiş olup T+B2 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1’e göre (2.04 ünite mg-1 protein ve 1.27 ünite mg-1 protein) en fazla artışlar %60 ve %46

oranlarında belirlenmiş olup T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. GR aktivitesine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde T+B2 ve T+B3 uygulamaları arasında fark bulunmazken, MAE 45 genotipinde T+B2 uygulamasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil.4.11. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin GR enzim aktivitesi üzerine etkisi

Glutasyon redüktaz (GR) kloroplast, sitozol, mitokondrilerde yer alarak GSH/GSSG redoks dengesini korumak için okside durumdaki glutasyonun (GSSG) glutatyon (GSH) indirgenmesinden sorumlu olan enzimdir (Hasanuzzaman ve ark., 2020; Guan, 2023). Mısır genotiplerinde GR aktivitesi bor uygulamalarına bağlı olarak artarken en fazla artış B3 uygulaması ile MAE 103 mısır genotipinde olmuştur. Tuz stresi koşullarında her iki mısır genotipinin GR aktivitesi artarken, T+B2 uygulamasında önemli düzeyde artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum mısır genotiplerinde tuz stresi koşullarında yeterli B olan T+B2 uygulaması GR aktivitesinde artış sağlayarak tuz stresine karşı koruma sağlayabilmiştir. Yeterli B, GR enzim aktivitesini artırmada rol oynamıştır. Tuz stresi koşulları sonucunda oluşan iyon toksisitesi nedeniyle hücreler zarar görmektedir. Antioksidan savunma sistemi enzimlerinden olan GR enzimi tuz stresinin olumsuz etkilerini azaltmaya yardımcı olabilmektedir. Tuz stresi koşullarında mısır genotiplerinin GR enzim aktivitesini artırarak bitki hücrelerinde oluşan H₂O₂

birikimini CAT, APX ve POX gibi diğer enzimlerle birlikte azaltabilir. GR enzimi kloroplast stromasında, mitokondrilerde, peroksizomlarda ve sitoplazmada bulunarak H₂O₂ süpürülmesine yardımcı olmaktadır (Rajput ve ark., 2021). Askorbat-glutasyon döngüsünün önemli bir bileşeni olan GR enzimi, H₂O₂ temizlenmesinde ve GSH'ın seviyelerini koruyarak stres toleransı sağlayabilir. Çalışmamızda, tuz stresi koşullarında GR enzim aktivitesi genotipler arasında farklılıklar olduğunu ortaya koymuştur. Tuz stresi koşullarında bor uygulamaları GR enzim aktivitesini artırarak strese karşı tolerans gösterebilir. Ayrıca mısır genotiplerinde T+B1 ve T+B0 uygulamalarında H₂O₂ ve MDA birikiminde artışlar olurken, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında bu birikimlerde azalmalar meydana gelmiştir. Bu birikimlerin diğer antioksidan enzimlerle birlikte GR enzim aktivitesi tuz stresinin olumsuz etkilerini azaltmaya yardımcı olabilir. GR enzim aktivitesi özellikle T+B2 uygulamalarında önemli düzeyde artış göstererek oksidatif stresten kaynaklanan hasarlanmaları engelleyebilmektedir. GR enziminin H₂O₂ temizlenmesine yardımcı olan antioksidan özelliği sayesinde tuz stresi koşullarında bor uygulamaları ile strese karşı tolerans sağlayabilir. Uygulamalara bağlı olarak MAE 103 genotipinin GR enzim aktivitesi MAE 45 genotipine göre daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmiştir. GR enzim aktivitesinde meydana gelen değişimler mısır genotipler arasındaki farklılıkları ortaya koyabilmiştir. Benzer olarak, tuza toleranslı mısır bitkisinin GR enzim aktivitesi, tuza hassas olan mısır bitkisinden daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir (André ve ark., 2006)

Bulgularımıza paralel olarak, Hamurcu ve ark (2020) tarafından su kültürü ortamında iki farklı hibrit mısır çeşidine (bor toleranslı RX 770 ve bor duyarlı TTM 8119) farklı B dozlarında (0, 2.5, 25 ve 50 ppm B) bitkinin gelişimi üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada artan bor dozlarında sırasıyla GR enzim aktivitesi kontrole göre RX 770'de mısır çeşidinde %33, %103 ve %236 oranında, TTM 8119 çeşidinde 2.5 ppm B dozunda %34 oranında önemli ölçüde artış olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmamıza benzer olarak, sera koşullarında soya bitkisine (Glycine max L.) artan tuz dozlarında (150, 300 ve 450 mM NaCl) tuz stresi uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında soya bitkisinin yapraklarına 1mM B uygulanması sonucunda GR enzim aktivitesi kontrole göre tuz dozlarında artış gösterdiği belirlenmiştir (Alharby ve ark., 2021). Ayrıca mısır genotiplerine BR5033 (tuza toleranslı) ve BR5011 (tuza hassas) kontrollü koşullarda 100 mM NaCl tuz stresi uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında GR enzim aktivitesi tuza toleranslı olan mısır genotipinde tuza hassas genotipe göre daha fazla oranda artış

gösterdiğini bildirmişlerdir (André ve ark., 2006). Ayrıca sera koşullarında soya bitkisine (*Glycine max* L.) artan tuz dozlarında (150, 300 ve 450 mM NaCl) stres uygulanmıştır. GR enzim aktivitesi artan tuz dozlarında kontrole göre sırasıyla %45, %126 ve %228 oranlarında artış gösterdiğini belirlemişlerdir (Alharby ve ark., 2021).

4.4.6. Oksitlenmiş glutatyon (GSSG) içeriği

Uygulamaların mısır genotiplerinin GSSG içeriklerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 da ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.12’de verilmiştir.

Uygulamaların GxTxB interaksyonuna etkileri incelendiğinde, GSSG içerikleri üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.8).

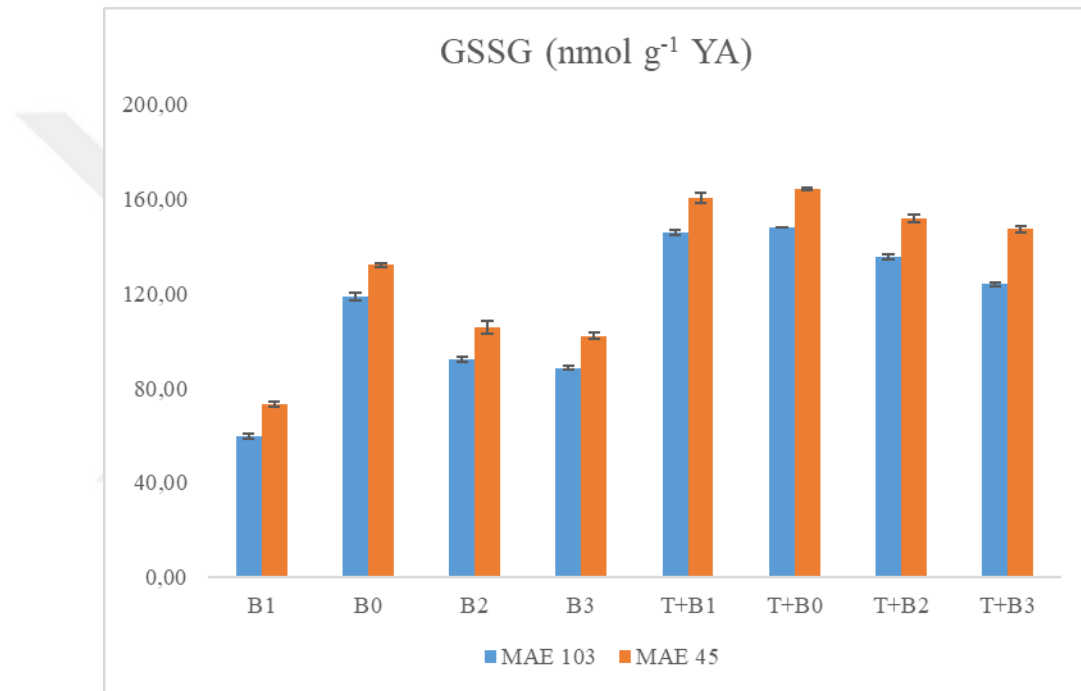
Mısır genotiplerinin GSSG içeriklerine bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Bu artış MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0, B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %98 ile %80, %54 ile %44, %48 ile %39, %144 ile %119, %148 ile %124, %127 ile %153 ve %108 ile %101 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek GSSG içerikleri GxTxB interaksyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (118.68 ünite mg-1 protein ve 132.26 ünite mg-1 protein) olarak belirlenmiş olup yetersiz B uygulaması olan 0 mM B uygulaması (B0) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre GSSG içerikleri (59.80 ünite mg-1 protein ve 73.35 ünite mg-1 protein) en fazla artış %98 ve %80 oranlarında olup B0 uygulaması ile elde edilmiştir. GSSG içerikleri ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark bulunmazken, MAE 45 genotipinde B2 ve B3 uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin GSSG içerikleri tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin GSSG içerikleri T+B1’e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %1 ve %2 oranlarında artarken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %7 ile %5 oranlarında ve %15 ile

%8 oranlarında azalmalar olduğu belirlenmiştir.

En yüksek GSSG içerikleri GxTxB interaksyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (148.24 ünite mg-1 protein ve 164.22 ünite mg-1 protein) belirlenmiş olup T+B0 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1'e göre (146.06 ünite mg-1 protein ve 160.39 ünite mg-1 protein) en fazla artışlar %1 ve %2 oranlarında belirlenmiş olup T+B0 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde GSSG içeriklerine ait yapılan LSD testine göre T+B1 ve T+B0 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark bulunmadığı belirlenmiştir.



Şekil.4.12. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin GSSG içerikleri üzerine etkisi

GR, indirgeyici olarak NADPH kullanılarak glutatyon disülfürün (GSSG) indirgenmiş sülfhidril formuna (GSH) indirgenmesini katalize etmeye yardımcı olan bir flavoprotein oksidoredüktazdır (Mishra ve ark., 2023). Ayrıca GR, glutatyon disülfürde bir disülfür bağının oluşumunu katalize ederek hücrel GSH/GSSG oranını etkili bir şekilde koruyabilmektedir (Aftab ve Hakeem, 2022). Mısır genotiplerinin GSSG içerikleri bor uygulamalarına bağlı olarak artarken en fazla artış B0 uygulaması ile MAE 103 mısır genotipinde olmuştur. Tuz stresi koşullarında her iki mısır genotipinin GSSG içerikleri artarken, T+B1 ve T+B0 uygulamasında önemli düzeyde artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum B2 ve B3 uygulamaları GSSG içeriklerini artırırken, yetersiz B bitkide GR

enzim aktivitesinin azalmasına GSSG içeriğinin artmasına neden olabilir. Yetersiz B askorbik asit (indirgenmiş form) ve sülfhidril (SH) bileşikleri glutatyon redüktaz seviyelerini azaltabilir (Cakmak and Romheld 1997). Bitkilerde bor hücre membran metabolizmasında ve enzim reaksiyonlarının iyonlarında görev almaktadır (Blevins ve Lukaszewski, 1998; Goldbach ve Wimmer, 2007). Mısır genotiplerinin GSSG içeriklerinde meydana gelen bu artışlarda tuz stresi bitkilerde iyon toksisitesine neden olarak hücre sel yapılar zarar verebilmektedir. Bitkiler enzimatik reaksiyonların bir sonucu olarak, oksitlenmiş glutatyonun formu (GSSG) üretilir ve GR enzimi tarafından katalize edilen reaksiyonla GSH'ye indirgenir (Edwards ve ark., 1990). Tuz stresi koşullarında GR enzim aktivitesinin mısır genotiplerindeki değişimleri GSSG içerikleri artışa neden olabilir. Bu durumda GR enzimi GSSG içeriğini artırması nedeniyle daha fazla GSH indirgenmesinde rol oynayacaktır. Çalışmamızda, tuz stresi koşullarında GSSG içeriği genotipler arasında farklılıkları ortaya koymaktadır. Tuz uygulaması ile tuzxbor interaksyonu karşılaştırıldığında mısır genotiplerinin GSSG içerikleri T+B1'e göre T+B0 uygulamasında artarken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında azalma göstermesinde bor olumlu yönde etki edebilir. Uygulamalara bağlı olarak MAE 45 genotipinin GSSG içeriği MAE 103 genotipine göre daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmiştir. MAE 45 mısır genotipinin yüksek GSSG içeriğine sahip olması tuz stresinden MAE 103 genotipine göre daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca tuz stresi koşullarında MAE 45 mısır genotipinin GR enzim aktivitesindeki azalma GSSG içeriğini artırabilir. Bor uygulamalarında GSSG içeriklerindeki artışlar genotipler arasındaki farklılıkları ortaya koymaktadır. Bulgularımıza paralel olarak, yetiştirme kabiniinde mısır çeşidinin (var.16x 36) köklerine artan B dozlarında (4 uM, 16 uM ve 32 uM B) besin çözeltisiyle uygulanmıştır. Araştırma artan bor dozlarına bağlı olarak mısır bitkisinin GSSG içeriğinde artışlar meydana geldiği belirlenmiştir(Corrales ve ark., 2008). Benzer olarak, Punia ve ark (2021) sera koşullarında tuza toleranslı SSG 59-3 ve tuza hassas PC-5 mısır genotiplerine farklı tuz konsantrasyonları (60, 80, 100 ve 120 mM NaCl) uygulandı. Mısır genotiplerinde artan tuz konstrasyonlarına bağlı olarak GSSG içeriğinde artışlar meydana geldiğini belirlenmişlerdir. Ayrıca tuza toleranslı CSR-27 ve tuza hassas Malviya-36 pirinç çeşitlerine sera koşullarında 70 ve 140 mM NaCl tuz stresi saksılara uygulandı. Tuz stresi koşulları altında tuza hassas olan Malviya-36 pirinç çeşidinin GSSG içeriğinde önemli düzeyde artış olduğunu belirlemişlerdir (Mishra ve ark., 2013).

Araştırmamıza benzer olarak, sera koşullarında soya bitkisine (*Glycine max* L.) artan tuz dozları (150, 300 ve 450 mM NaCl) uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında soya bitkisinin yapraklarında GSSG içerikleri tuz dozlarında artarken, 1mM B uygulamaları sonucunda GSSG içeriğinde azalma gösterdiği belirlenmiştir (Alharby ve ark., 2021). Ayrıca su kültürü ortamında üç farklı (Super gold, 900M gold ve PS-999) mısır hibritine 120 mM NaCl tuz stresi uygulanması sonucunda GSSG içeriği kontrole göre tuzlu koşullar altında önemli ölçüde artış gösterdiğini belirlemişlerdir (Billah ve ark., 2017).

4.4.7. Glutasyon (GSH) içeriği

Uygulamaların mısır genotiplerinin GSH içeriklerine ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.8, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10 da ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.13’de verilmiştir.

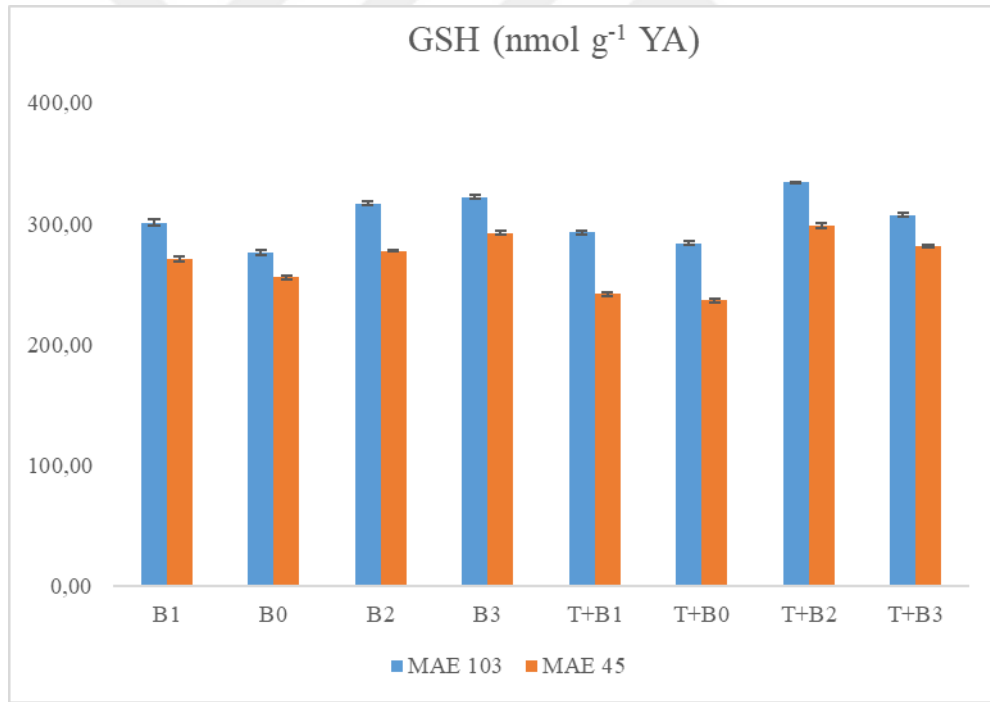
Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, GSH içeriklerine üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.8).

Mısır genotiplerinin GSH içeriklerine bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. Ancak MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0, T+B1 ve T+B0 uygulamalarında sırasıyla %8 ile %5, %3 ile %11, %6 ile %13 oranlarında azalırken; B2, B3, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %5 ile %3, %7 ile %8, %11 ile %10 ve %2 ile %4 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.

En yüksek GSH içerikleri GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde (322.21 ünite mg-1 protein ve 292.39 ünite mg-1 protein) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre (300.68 ünite mg-1 protein ve 270.37 ünite mg-1 protein) en fazla artış %7 ve %8 oranlarında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. GSH içeriklerine ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde B2 ve B3 uygulamaları arasında fark bulunmazken, MAE 45 genotipinde uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin GSH içerikleri tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin GSH içerikleri T+B1'e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %3 ve %2 oranlarında azalırken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %14 ile %23 oranlarında ve %5 ile %16 oranlarında artış olduğu belirlenmiştir.

En yüksek GSH içerikleri GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (334.07 ünite mg-1 protein ve 297.99 ünite mg-1 protein) belirlenmiş olup T+B2 uygulamalarından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1'e göre (3.91 ünite mg-1 protein ve 2.93 ünite mg-1 protein) en fazla artışlar %14 ve %23 oranlarında belirlenmiş olup T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde GSH içeriklerine ait yapılan LSD testine göre sırasıyla T+B2 uygulamasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.



Şekil.4.13. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin GSH içeriklerinin üzerine etkisi

Glutasyon (GSH) H₂O₂ yi azaltmak için ROT süpürücü enzimlerden biridir (Li ve ark., 2010). Glutasyonun (GSH) metabolik düzenleyici ve antioksidan olarak rolü alarak glutasyon disülfite (GSSG) okside olmasıyla sonuçlanmaktadır (Noctor ve Foyer, 1998). Mısır genotiplerinde GSH aktivitesi bor uygulamalarına bağlı olarak artarken en fazla

artış B3 uygulaması ile MAE 103 mısır genotipinde olmuştur. Tuz stresi koşullarında her iki mısır genotipinin GSH aktivitesi artarken, T+B2 uygulamasında önemli düzeyde artış gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmamızda mısır genotiplerinin GSH içeriği B2 ve B3 uygulamalarında artış gösterirken, B0 uygulamasında azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumda bor bitkilerde önemli bir antioksidan olan GSH içeriğinin artmasını sağlarken yetersiz B koşullarında azalmalar göstermesine neden olabilir. Yetersiz B koşulları bitkide GR enzim aktivitesinin azalmasına GSSG içeriğinin artışına ve GSH içeriklerinde azalmalar meydana getirebilmektedir. Daha önce yapılan araştırmalarda bor, hücre zarı proteinlerde ve enzimatik işleyişlerde yer alarak zar bütünlüğünün iyileştirilmesinde görev aldığı bilinmektedir. Yetersiz B, askorbik asit ve glutatyon metabolizmasını büyük ölçüde azaltarak reaktif oksijen türlerini oluşturduğunu bildirmişlerdir (Marschner, 2011). GSH içeriği B uygulamalarına bağlı olarak artış göstermesi genotipler arasındaki farklılıkları ortaya koymaktadır. Bulgularımıza paralel olarak, mısır bitkisine (*Zea mays* L. cv. Hido) hidroponik kültürde 8 mM B uygulandığında GSH içeriğinde artışlar meydana geldiğini bildirmişlerdir (Kohnhehshahri ve Demir, 2021).

Tuz stresi sonucunda oksidatif hasarlanmalar meydana geldiğinden dolayı bitki hücresindeki yapılara zarar verebilmektedir. Bitkilerdeki antioksidan savunma sistemi bu oksidatif hasarlanmanın etkilerini azaltabilmektedir. Glutatyon, hücrede hem indirgenmiş (GSH) hem de oksitlenmiş (GSSG) formlarda bulunur ve hücrenin ana redoks çiftini oluşturabilmektedir (Schafer ve Buettner, 2001). Bitkiler tuz stresi ve yetersiz B koşullarında iki stres faktörünün biraraya gelmesiyle hücre yapıları bozularak daha fazla ROT üretimlerine neden olabilmektedir. GSH, hücrelerden ROT temizlenmesinde ve ROT'u tamponlamak için enzimatik reaksiyonda kullanılan antioksidandır. Mısır genotiplerinin GSH içerikleri tuz stresi koşullarına göre T+B0 uygulamalarında azalırken, T+B2 uygulamasında artış göstererek borun olumlu yönde etkisini gösterebilir. Mısır genotiplerinin GSH içerikleri T+B2 uygulamalarında önemli düzeyde artış göstererek tuz stresine karşı tolerans sağlayabilmiştir. Uygulamalara bağlı olarak MAE 103 genotipinin GSH içeriği MAE 45 genotipine göre daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda MAE 103 genotipinin MAE 45 genotipine göre tuz stresine karşı toleransını daha fazla sağlamış olabilir. Tuz stresi koşullarında MAE 45 genotipinin GSSG içeriği artarken, GSH içeriği azalma göstermiştir. Ayrıca bu koşullarda MAE 103 genotipi GR enzim aktivitesini artırarak GSSG içeriğinin artışına ve daha fazla GSH indirgenmesinde

rol oynamış olabilir. Bitkiler enzimatik reaksiyonların bir sonucu olarak, oksitlenmiş glutatyon (GSSG) üretilir ve GR enzimi tarafından katalize edilen reaksiyonla GSH'ye indirgenir (Edwards ve ark., 1990). Araştırmamıza paralel olarak bitkilerin tuz stresi altında artan GSSG içeriği, GSH'nin oksidatif stres veya azalmış GR aktivitesi tarafından oluşturulan oksiradikallerle reaksiyonu olarak kabul edilmektedir (Aravind ve Prasad, 2005).

Benzer olarak, Punia ve ark (2021) sera koşullarında tuza toleranslı SSG 59-3 ve tuza hassas PC-5 mısır genotiplerine farklı tuz konsantrasyonları (60, 80, 100 ve 120 mM NaCl) uygulandı. Mısır genotipleri artan tuz konstrasyonlarına bağlı olarak GSH içeriklerinde artışlar meydana gelmiştir. Kontrole göre GSH içeriğinde 100 mM NaCl uygulamasında SSG59-3 ve PC-5 mısır genotiplerinin yapraklarında sırasıyla %54 ve %21 oranlarında artışlar olduğu belirlenmiştir. GSH içeriği tuza toleranslı olan SSG59-3 mısır genotipinde daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmiştir. Araştırmamıza benzer olarak, sera koşullarında soya bitkisine (Glycine max L.) tuz dozları (75 ve 150 mM NaCl) ve 1mM B uygulanmıştır. Tuz stresi (75 ve 150 mM NaCl) koşullarında 1mM B uygulamalarında soya bitkisinin GSH içerikleri sırasıyla %26 ve %49 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir (Alharby ve ark., 2021).

4.5. Bitki Besin Elementleri

Uygulamaların mısır genotiplerinin gövde Ca, Mg, K, Na, Cl ve B konsantrasyonlarına ve kaldırılan Na, Cl ve B miktarlarına ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12' de, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.13, Çizelge 4.14, Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.16'da, bu değerlere ait grafikler Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.11. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin gövde Ca, Mg, K, Na, Cl ve B konsantrasyonlarına ait varyans analiz sonuçları

Kareler Ortalaması							
Uygulamalar	S.D.	Ca	Mg	K	Na	Cl	B
Genotip (G)	1	1294.03*	4312176**	328.07**	506.92**	2003.01**	3278.23**
Tuz Uyg. (T)	1	882.71**	92114**	146.01**	6378.39**	43355.59*	9803.80**
Bor Uyg. (B)	3	89.14**	2698866**	443.54**	74.54**	106.13**	148270.30*
GxT İnt.	1	37.89**	48295**	11.14**	442.49**	1304.97**	102.46**
GxB İnt.	3	10.92**	44661**	18.59**	30.11**	211.3**	1627.53**
TxB İnt.	3	138.89**	477548**	29.47**	67.69**	143.05**	8559.49**
GxTxB İnt.	3	38.90**	13950**	8.93**	29.78**	155.40**	552.16**
Hata	32						
Genel	47						

Çizelge 4.12. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin gövdeden kaldırılan Na, Cl ve B miktarlarına ait varyans analiz sonuçları

Kareler Ortalaması				
Uygulamalar	S.D.	Na	Cl	B
Genotip (G)	1	133.53 **	315.05 **	229.29 **
Tuz Uyg. (T)	1	1966.24 **	2447.98 **	882.43 **
Bor Uyg. (B)	3	36.07 **	45.24 **	2763.96 **
GxT İnt.	1	102,81**	136 **	45.27 **
GxB İnt.	3	5.32 **	18,95**	117.74 **
TxB İnt.	3	26.9 **	3.42 *	564.59 **
GxTxB İnt.	3	4.87 **	9.52**	16.89 **
Hata	32			
Genel	47			

**, p<0.01 ; Uyg.: uygulama; İnt: interaksiyon; S.D.:Serbestlik derecesi

Çizelge 4.13. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının MAE 103 mısır genotipinin gövde Ca, Mg, K, Na ,Cl ve B konsantrasyonları üzerine etkisi

Uygulamalar	Ca (%)			Mg(%)			K (%)			Na (%)			Cl(%)			B (ppm)		
	% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim		
B1	0.58 c	-		0.26 b	-		4.25 c			0.14 e			0.98 d			17.55 ef		
B0	0.70 a	22		0.32 a	21		3.46 d	-19		0.12 e	-18		0.49 e	-50		13.95 f		
B2	0.65 b	12		0.22 c	-15		5.14 b	21		0.15 e	4		1.09 d	11		232.66 c	-20	
B3	0.63 b	9		0.21cd	-22		5.60 a	32		0.17 e	18		0.92 d	-6		1397.74 a	1226	
T+B1	0.28 de	-52	-	0.15 e	-45	-	3.10 e	-27		5.57 a	3809		11.84 a	1106		27.45 e	7866	
T+B0	0.22 f	-63	-22	0.12 e	-54	-16	2.38 f	-43	-23	3.62 d	2444	-35	8.38 c	754	-29	24.99 ef	56	-9
T+B2	0.31 d	-47	11	0.18 d	-32	24	2.16 fg	-49	-30	5.02 b	3422	-10	8.93 b	810	-25	137.10 d	42	399
T+B3	0.24 ef	-58	-13	0.20 cd	-24	39	1.93 g	-54	-38	4.56 c	3104	-18	8.65 bc	782	-27	998.40 b	681	3537

Çizelge 4.14. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının MAE 45 mısır genotipinin gövde Ca, Mg, K, Na ,Cl ve B konsantrasyonları üzerine etkisi

Uygulamalar	Ca (%)			Mg(%)			K (%)			Na (%)			Cl(%)			B (ppm)		
	% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim			% değişim		
B1	0.53 b	-		0.27 a	-		3.84c			0.09 d			0.41 d			14.84 d	-	
B0	0.61 a	14		0.17 b	-35		3.22 d	-16		0.07 d	-27		0.19 d	-53		10.53 d	-29	
B2	0.55 b	3		0.23 a	-12		4.29b	12		0.11 d	19		0.88 c	116		118.54 c	701	
B3	0.47 c	-11		0.20 b	-26		4.70a	22		0.13 d	49		0.79 c	93		1266.38i	8434	
T+B1	0.25 d	-54	-	0.14 c	-46	-	2.74e	-29		3.35 b	3646		6.35 b	1453		21.09 d	42	-
T+B0	0.19 e	-64	-23	0.06 f	-76	-56	2.14f	-44		3.03 c	3282	-10	7.38 a	1706	16	20.32 d	37	-4
T+B2	0.27 d	-50	8	0.13 d	-50	-7	1.79fg	-53		3.70 a	4036	10	6.49 b	1488	2	121.23 c	717	475
T+B3	0.21 e	-61	-16	0.11 e	-60	-26	1.63g	-58		3.37 b	3667	1	6.21 b	1421	-2	666.06 b	4388	3057

Duncan testine göre küçük harfler aynı sütundaki ortalamalar arasındaki önemliliği ifade etmektedir.

4.5.1. Gövde Ca, Mg ve K konsantrasyonları

Uygulamaların mısır genotiplerinin gövde Ca, Mg ve K konsantrasyonlarına ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.11, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14 de ve bu değerlere ait grafikler Şekil 4.14 'de verilmiştir.

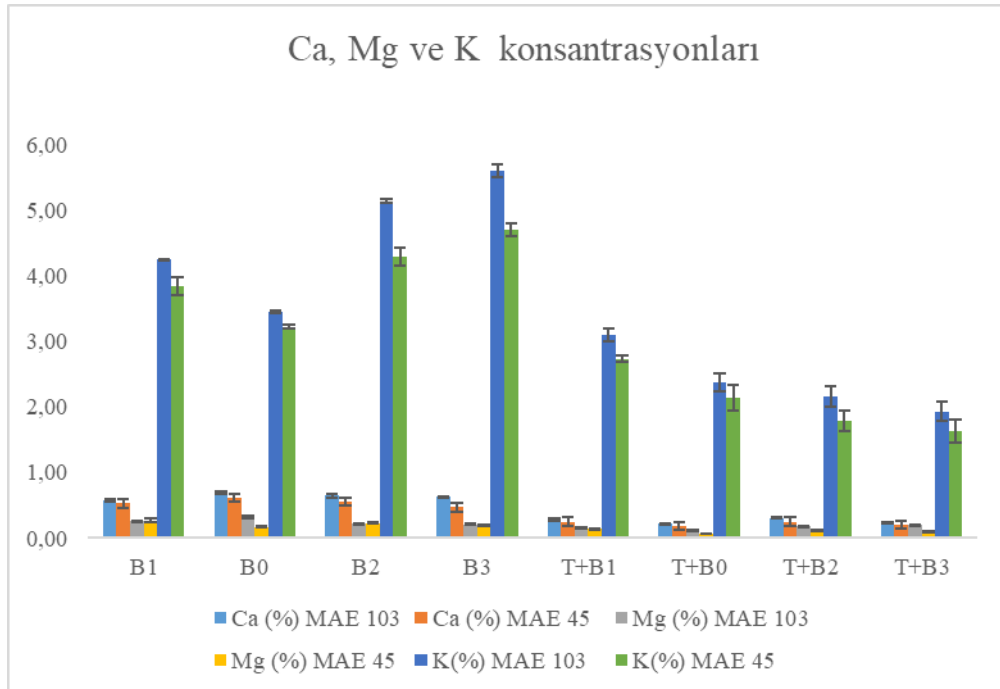
Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, Ca, Mg ve K konsantrasyonları üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.11).

Mısır genotiplerinin **Ca konsantrasyonları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre artarken, tuz stresi (T+B1) koşullarında azalmalar olduğu belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde sırasıyla B1'e göre B0 ve B2 uygulamalarında %22 ile %14 ve %12 ile %3 oranlarında artarken, B3 uygulamasında %9 oranında artarken %11 oranında azalış göstermiştir. Ayrıca T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %52 ile %54, %63 ile %64, %47 ile %50 ve %58 ile %61 oranlarında azalmalar olduğu belirlenmiştir. En yüksek **Ca konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (% 0.70 ve % 0.61) yetersiz B uygulamasından (B0, 0 mM B) elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre (%0.58 ve %0.53) en fazla artış %22 ve %14 oranlarında olup B0 uygulaması ile elde edilmiştir. Ca konsantrasyonlarına ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B0 uygulaması diğer uygulamalar arasında istatistiki bakımdan önemli olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin **Mg konsantrasyonları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında azalmalar olduğu belirlenmiştir. B1'e göre B0, B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla MAE 103 genotipinde %21 oranında artarken, %15, %22, %45, %54, %32, %24 oranlarında azalırken; MAE 45 genotipinde %35, %12, %26, %46, %76, %50 ve %60 oranlarında azalmalar olduğu belirlenmiştir. En yüksek **Mg konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde (% 0.32) belirlenmiş olup yetersiz B uygulamasından (B0, 0 mM B) elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde B1'e göre (%0.26) en fazla artış %21 oranında B0 uygulamasından elde edilmiştir. **Mg**

konsantrasyonlarına ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde B0 uygulaması diğer uygulamalar arasında istatistiki bakımdan önemli olduğu belirlenmiştir. MAE 45 genotipinde B1 ve B2 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin **K konsantrasyonları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında azalmalar olduğu belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerde sırasıyla B1'e göre B0, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %19 ile %16, %27 ile %29, %43 ile %44, %49 ile %53 ve %54 ile %58 oranlarında azalırken; B2 ve B3 uygulamalarında %21 ile %12 ve %32 ile %22 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. GxTxB interaksiyonunda en yüksek **K konsantrasyonları** MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (%5.60 ve %4.70) belirlenmiş olup toksik B uygulamasından (B3, 4 mM B) elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre (%4.25 ve %3.84) en fazla artış %32 ve %22 oranlarında B3 uygulamasından elde edilmiştir. **K konsantrasyonlarına** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B4 uygulaması diğer uygulamalar arasında istatistiki bakımdan önemli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.14. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin gövde Ca , Mg ve K konsantrasyonları üzerine etkisi

Mısır genotiplerinin **Ca konsantrasyonları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde Ca konsantrasyonları T+B1'e göre T+B0 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %22 ile %23 ve %13 ile %16 oranlarında azalırken; T+B2 uygulamasında %11 ile %8 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **Ca konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1'e göre T+B2 uygulamasında en fazla artış %11 ve %8 oranında T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. Ca konsantrasyonları ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1 ve T+B2 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin **Mg konsantrasyonları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. Mg konsantrasyonları T+B1'e göre T+B0 uygulamasında MAE 103 genotipinde %16 oranında azalırken, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %24 ve %39 oranlarında artarken; MAE 45 genotipinde %56, %7 ve %26 oranlarında azalış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **Mg konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde T+B3 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 genotipinde T+B1'e göre T+B3 uygulamasında en fazla artış %39 oranında olduğu belirlenmiştir. Mg konsantrasyonları ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde T+B0 ve T+B2 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark bulunmazken, MAE 45 genotipinde uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin **K konsantrasyonları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. **K konsantrasyonları** MAE 103 ve MAE 45 genotipleri T+B1'e göre T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %23 ile %22, %30 ile %35 ve %38 ile %41 oranlarında azalış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **K konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 genotipinde T+B1 uygulamasından elde edilmiştir. **K konsantrasyonları** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B0 ve T+B2 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.

Tuz stresi bitkilerde besin elementleri alımında dengesizliklere ve metabolik süreçlerde aksamalar meydana getirebilmektedir. Tuz stresi bitkilerde iyonik dengenin

bozulmasıyla hücrede önemli metabolik görevlerde yer alan Ca, Mg ve K gibi besin elementlerinin alımında olumsuz yönde etkilemiştir. Mısır genotiplerinde Ca konsantrasyonu tuz stresi koşullarına göre T+B0 ve T+B3 uygulamalarında azalırken, T+B2 uygulamalarında artış göstermesinde yeterli B kalsiyumun alımında hareketliliğini artırarak tuz stresi koşullarında olumlu yönde etki gösterdiği söylenebilir. MAE 103 genotipindeki Ca içeriğindeki artış tuz toleransını sağlamada belirleyici rol oynayabilir. Daha önce yapılan araştırmalarda köklerde artan Na ve Cl konsantrasyonu Ca, Mg ve K besin elementlerinin ve iyonik ilişkilerini değiştirebildiğini bildirmişlerdir (Muhammad,2004; Munns, 2005). Ayrıca mısır genotipleri B0 uygulamasında Ca içeriği MAE 45 genotipinden daha fazla oranlarda olduğu belirlenmiştir. Yetersiz B (B0) koşullarında bor elementinin hücre metabolizmasında işlevini yerine getirememesi nedeniyle bitkinin Ca konsantrasyonunda daha fazla artış gösterebilir. Mısır genotiplerinin B0 uygulamasında kalsiyum hareketliliğini artırarak Ca alımını ve kullanımını sağlayarak konsantrasyonunda artışa neden olabilir. Ca, hücre duvarının yapılarını stabilize edilmesinde, hücre duvarının enzim aktivitelerinde, iyon taşınmasında, bitki zarlarının yapısal ve işlevsel süreçlerinde önemli rol oynamaktadır (Neves-Piestun ve Bernstein, 2001;Eşref ve Harris, 2004; Tuna ve ark., 2007). Ayrıca kalsiyum bitkilerde membran stabilizasyonu ve sinyalleşme süreçlerinde yer almaktadır (Qiu ve ark.,2002). Mısır genotiplerinin Mg içeriği bor uygulamaları ve tuz stresinde azalma göstererek magnezyum alımını olumsuz yönde etkileyebilir. Tuz stresi nedeniyle ortaya çıkan iyon dengesizliği Mg alımını azaltabilir. Ayrıca tuz stresi bitkilerin köklerindeki besin elementinin alım mekanizmalarını bozarak elementlerin bitki köklerine geçişini engileyerek Mg içeriğinin azalmasına neden olabilir. Mısır genotipleri B3 uygulamalarında K içeriğinde meydana gelen artışta toksik bor seviyesinde K alımını köklerden gövdeye fotosentez ürünlerinin taşınımı engelleyerek yada yavaşlatarak kuru ağırlıklarında azalmalara neden olabilir. Mısır genotipleri tuz stresi koşulları altında kontrole göre K içeriğinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Tuz stresi bitki köklerinde iyon dengesizliğinin oluşmasıyla bitkinin K alımını ve hücre içindeki metabolik süreçleri olumsuz yönde etkileyerek K içeriğini azaltabilir. Araştırmalarımıza paralel olarak tuz stresi mısır bitkisinin yapraklarındaki K içeriğini azalttığını belirlemişlerdir(de Azevedo Neto ve ark., 2004). Ayrıca tuz stresinde Na ve K elementleri arasındaki rekabet mısırın yaprak ve köklerindeki K içeriğini ciddi şekilde azalttığını aynı zamanda simplastik dokularda %64 oranında düşüşlere neden olduğunu bildirmişlerdir(de Azevedo Neto ve Tabosa 2000; Kaya ve ark., 2010; Shahzad ve ark.,

2012). Na, mısır bitkisi için stoma düzenlemesini bozarak bitkide K alımına, taşınımına, su kaybına ve nekrozlara neden olan toksik bir iyondur (Fortmeier ve Schubert 1995 ; Sümer ve ark., 2004). Ayrıca, tuz stresi sadece potasyum alım oranlarını azaltarak mısırdaki kökten sürgün dokularına potasyum translokasyonunu büyük ölçüde bozarak kök içeriğinden daha düşük potasyum sürgün içerikleri olduğu belirlenmiştir (Shahzad ve ark., 2012). Daha önce yapılan çalışmalara paralel olarak tuzlu topraklarda Na ve Cl birikmesi, N, P, K, Ca, Mg gibi temel besin elementleriyle olan güçlü etkileşimlerinden dolayı mısırdaki ciddi beslenme dengesizliklerine neden olduğu tespit edilmiştir (Karimi ve ark., 2005 ; Turan ve ark., 2010). Tuz stresi koşullarında bitkilerin köklerinden su alımını engelleyerek bitki hücrelerindeki su potansiyelini düşürebilmektedir.

Uygulamalara bağlı olarak MAE 103 genotipinin Ca içeriği MAE 45 genotipine göre daha yüksek oranlarda olduğu tespit edilmiştir. Tuz stresi koşullarında Ca içeriği MAE 103 genotipinde MAE 45 mısır genotipinde daha yüksek oranlarda olması bu koşullarda daha az etkilendiğini göstermektedir. Benzer olarak, Akram ve ark (2010 a) yaptıkları bir çalışmada on farklı melez mısır (*Zea mays* L.) tohumlarına (Pioneer 3062, Pioneer 32B23, Pioneer 30Y87, Pioneer 31R88, Dekalb 919, Dekalb 979, Dekalb 922, Hycorn 984, Hycorn 11 plus ve Hycorn 993) artan tuz dozları (40 mM, 80 mM ve 120 mM NaCl) uygulanmıştır. Uygulamalar sonucunda Na içeriğindeki önemli artışlar nedeniyle Ca ve K içeriklerinde düşmelere neden olabilir. Mısır hibritlerinin Na içeriğindeki artış, Ca ve K içeriklerini düşürerek K/Na ve Ca/Na oranlarının düşmesine neden olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca mısır bitkilerinin yapraklarında K ve Mg içerikleri tuz stresi koşullarında azalma gösterdiğini bildirmişlerdir (Qu ve ark., 2012).

Bulgularımıza paralel olarak, mısır (*L. amyloacea*) çeşidine sera koşullarında 2 mM B ve 4 mM B uygulamalarına bağlı olarak besin elementi içeriklerinde farklılıklar göstermiştir. Ca ve K içeriği artan bor dozlarında artış gösterdiği belirlenmiştir (Bastías, González-Moro ve González-Murua, 2004). Çalışmamıza benzer olarak, yerel mısır (*L. amyloacea*) çeşidine hidroponik ortamda tuz stresi (430 mM NaCl) koşullarında bor (3.6 mM H₃BO₃) uygulamasıyla bitkinin tolerans mekanizmasına etkileri incelenmiştir. Tuz stresi koşullarında mısır bitkisinin Ca ve K içeriklerinde kontrole göre azalmalar meydana gelirken, Mg içeriğinde artışlar olduğu belirlenmiştir. Ancak tuz stresi koşullarında bor uygulamasında Ca içeriği artarken, Mg ve K içeriklerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir (Martinez-Ballesta ve ark., 2008).

4.5.2. Gövde Na, Cl ve B konsantrasyonları ve kaldırılan miktarları

Uygulamaların mısır genotiplerinin gövde Na, Cl ve B konsantrasyonlarına ve kaldırılan miktarlarına ait varyans analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12’ de, elde edilen ortalama değerleri Çizelge 4.13, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15 ve Çizelge 4.15’da, bu değerlere ait grafikler Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da verilmiştir.

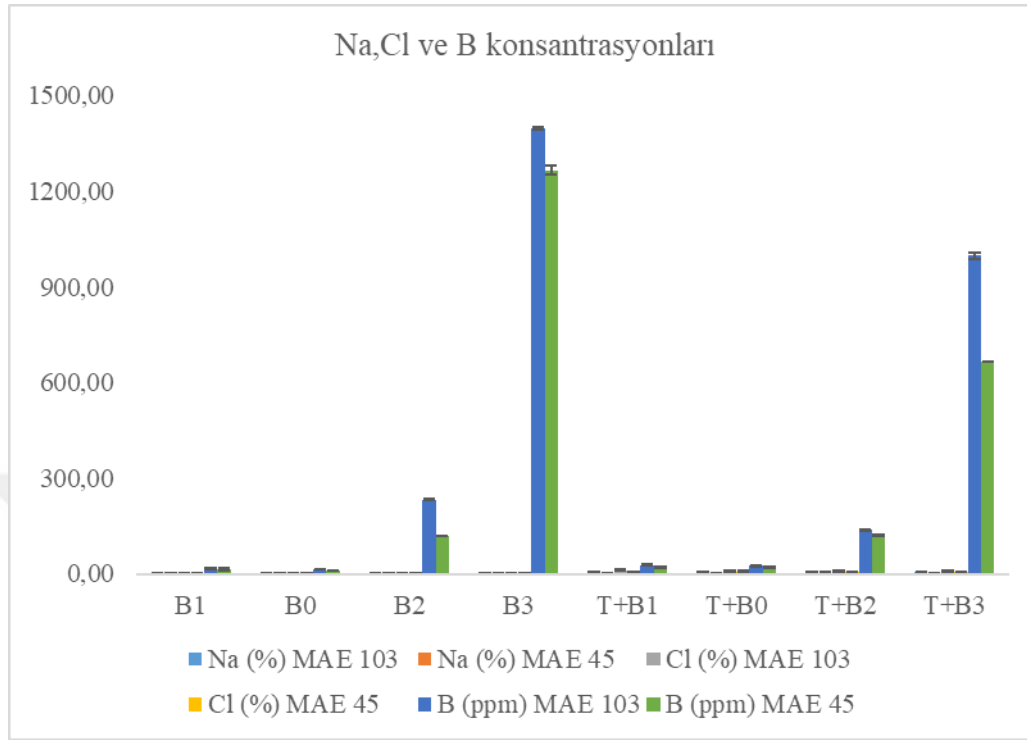
Uygulamaların GxTxB interaksiyonuna etkileri incelendiğinde, Na, Cl ve B konsantrasyonları ve kaldırılan miktarları üzerine etkileri istatistiki bakımdan %1 seviyesinde önemli bulunmuştur (Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12).

Mısır genotiplerinin **Na konsantrasyonları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0 uygulamalarında %18 ve %27 oranlarında azalırken, B2 ve B3 uygulamalarında %4 ile %19 ve %18 ile %49 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla 40 kat ile 37 kat, 26 kat ile 34 kat, 36 kat ile 41 kat, 33 kat ile 37 kat artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **Na konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (% 0.17 ve % 0.13) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre (%0.14 ve %0.09) en fazla artış %18 ve %49 oranlarında olup **B3 uygulaması** ile elde edilmiştir. Na konsantrasyonları ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir. Mısır genotiplerinin **kaldırılan Na miktarları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre B0 uygulamasında %43 ve %51 oranlarında azalırken, B2 ve B3 uygulamalarında %24 ile %29 ve %11 ve %14 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla 19 kat ile 16 kat, 11 kat ile 13 kat, 21 kat ile 20 kat, 17 kat ile 20 kat artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **kaldırılan Na miktarları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (0.47 g bitki⁻¹ ve 0.28 g bitki⁻¹) olarak belirlenmiş olup yeterli B uygulaması olan 0.5 mM B uygulaması (B2) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1’e göre (0.38 g bitki⁻¹ ve 0.22 g bitki⁻¹) en fazla artış %24

ve %29 oranlarında olup **B2 uygulaması** ile elde edilmiştir. **Kaldırılan Na miktarlarına** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde uygulamalar arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin Cl **konsantrasyonları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde sırasıyla B1'e göre B0 uygulamasında %50 ve %53 oranlarında azalırken, B2 uygulamasında %11 ile %116 oranlarında artarken; B3 uygulamasında %6 oranında azalırken %93 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 genotipinde B1'e göre T+B1 uygulamasında 12 kat, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında 9 kat artarken; MAE 45 genotipinde B1'e göre T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla 16 kat, 18 kat, 16 kat ve 15 kat artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **Cl konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (%1.09 ve %0.88) olarak belirlenmiş olup yeterli B uygulaması olan 0.5 mM B uygulaması (B2) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre (%0.98 ve %0.41) en fazla artış %11 ve %116 oranlarında olup B2 uygulaması ile elde edilmiştir. **Cl konsantrasyonlarına** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde B1, B2 ve B3 uygulamalarında; MAE 45 genotipinde B2 ve B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir. Mısır genotiplerinin **kaldırılan Cl miktarları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre B0 uygulamalarında %65 ve %68 oranlarında azalırken, B2 uygulamasında %32 ile %135 oranlarında artarken; B3 uygulamasında %12 oranında azalırken %46 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 genotipinde B1'e göre T+B1 ve T+B0 uygulamasında 6 kat ve 4 kat, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında 5 kat artarken; MAE 45 genotipinde B1'e göre T+B1 ve T+B0 uygulamalarında 7 kat, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında 8 kat artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **kaldırılan Cl miktarları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (3.45 g bitki⁻¹ ve 2.34 g bitki⁻¹) olarak belirlenmiş olup yeterli B uygulaması olan 0.5 mM B uygulaması (B2) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre (2.61 g bitki⁻¹ ve 1.00 g bitki⁻¹) en fazla artış %32 ve %135 oranlarında olup B2 uygulaması ile elde edilmiştir. **Kaldırılan Cl miktarlarına** ait yapılan LSD testine göre

MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1, B2 ve B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.15. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin gövde Na , Cl ve B konsantrasyonları üzerine etkisi

Mısır genotiplerinin **B konsantrasyonları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde sırasıyla B1 uygulamasına göre B0 uygulamasında %20 ve %29 oranlarında azalırken; B2, B3, T+B1, T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %1226 ile %701, %7866 ile %8434, %56 ile %42, %42 ile %37, %681 ile %717 ve %5590 ile %666 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **B konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (349.41 ppm ve 235.12 ppm) toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1 uygulamasına göre (17.55 ppm ve 14.84 ppm) en fazla artış %7866 ve %8434 oranlarında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. **B konsantrasyonlarına** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B3 uygulamasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir. Mısır genotiplerinin **kaldırılan B miktarları** bor uygulamaları ve tuz stresi koşullarında bor uygulamalarına bağlı olarak değişmekle birlikte genelde kontrol (B1) uygulamasına

göre tuz stresi (T+B1) koşullarında artış göstermiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre B0, T+B1 ve T+B0 uygulamalarında sırasıyla %45 ile %53, %24 ile %38 ve %38 ile %42 oranlarında azalırken; B2, B3, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %1486 ile %766, %7396 ile %6351, %364 ile %932 ve %2872 ile %2275 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **kaldırılan B miktarları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde (349.41 g bitki⁻¹ ve 235.12 g bitki⁻¹) olarak belirlenmiş olup toksik B uygulaması olan 4 mM B uygulaması (B3) ile elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B1'e göre (4.66 g bitki⁻¹ ve 3.64 g bitki⁻¹) en fazla artış %7396 ve %6351 oranlarında olup B3 uygulaması ile elde edilmiştir. **Kaldırılan B miktarlarına** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde B3 uygulamasında istatistiki bakımdan fark olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.15. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının 103 mısır genotipinden kaldırılan Na, Cl ve B miktarları üzerine etkisi

Uygulamalar	Na (g bitki ⁻¹)		Cl (g bitki ⁻¹)		B (g bitki ⁻¹)	
	% değişim		% değişim		% değişim	
B1	0.38 d	-	2.61 d	-	4.66 d	-
B0	0.21 d	-43	0.90 e	-65	2.57 d	-45
B2	0.47 d	24	3.45 d	32	73.91 c	1486
B3	0.42 d	11	2.31de	12	349.41 a	7396
T+B1	7.18 ab	1797	-	-	3.53 d	-24
T+B0	4.17 c	1001	-42	9.63 c	270	-37
T+B2	7.91 a	1990	10	14.08 a	440	-8
T+B3	6.33 b	1574	-12	11.99 b	360	-21
					138.51 a	2872
						382

Çizelge 4.16. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının 45 mısır genotipinden kaldırılan Na, Cl ve B miktarları üzerine etkisi

Uygulamalar	Na (g bitki ⁻¹)		Cl (g bitki ⁻¹)		B (g bitki ⁻¹)	
	% değişim		% değişim		% değişim	
B1	0.22 d		1.00 cd		3.64 de	
B0	0.11 d	-51	0.32 c	-68	1.73 e	-53
B2	0.28 d	29	2.34 c	135	31.57 c	766
B3	0.25 d	14	1.46 cd	46	235.12 a	6351
T+B1	3.59 bc	1539	6.76 b	576	2.25 e	-38
T+B0	2.94 c	1241	-18	7.18 b	618	6
T+B2	4.57 a	1989	27	9.09 a	801	33
T+B3	4.34 ab	1884	21	7.86 ab	697	18
					86.57 b	2275
						3753

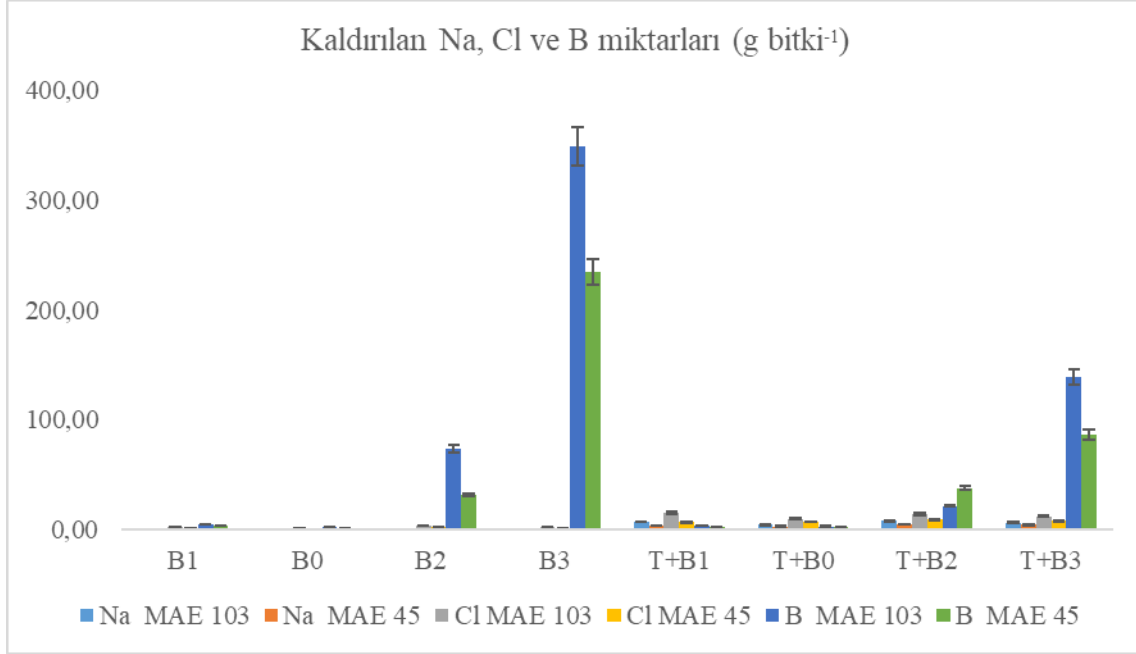
Mısır genotiplerinin **Na konsantrasyonları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. Na konsantrasyonları T+B1'e göre T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında MAE 103 genotipinde sırasıyla %35, %10, %18 oranlarında azalırken; MAE 45 genotipinde %10 oranında azalırken, %10 ile %1 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **Na konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde sırasıyla T+B1 ve T+B2 uygulamalarından elde edilmiştir. T+B1'e göre T+B0 uygulamasında en fazla azalma %35 oranında MAE 103 genotipinde elde edilirken, en fazla artış MAE 45 genotipinde T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. **Na konsantrasyonları** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde T+B1 uygulamasında; MAE 45 genotipinde T+B2 uygulamasında istatistiki bakımdan önemli fark olduğu belirlenmiştir. Mısır genotiplerinde gövdeden **kaldırılan Na miktarları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. Gövdeden kaldırılan Na miktarları MAE 103 genotipinde T+B1'e göre T+B0 ve T+B3 uygulamalarında %42 ve %12 oranlarında azalırken, T+B2 uygulamasında %10 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. MAE 45 genotipinde T+B1'e göre T+B0 uygulamasında %18 oranında azalırken, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında %27 ile %21 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. GxTxB interaksiyonunda gövdeden **kaldırılan en yüksek Na miktarları** MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1'e göre T+B2 uygulamasında en fazla artış %10 ve %27 oranlarında olduğu belirlenmiştir. **Na konsantrasyonlarına** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B2 uygulamasında istatistiki bakımdan önemli fark olduğu belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin **Cl konsantrasyonları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. Cl konsantrasyonları T+B1'e göre T+B0, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla MAE 103 genotipinde %29, %25, %27 oranlarında azalırken; MAE 45 genotipinde %16 ve %2 oranlarında artarken, T+B3 uygulamasında %2 oranında azalma gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek **Cl konsantrasyonları** GxTxB interaksiyonunda MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde sırasıyla T+B1 ve T+B0 uygulamalarından elde edilmiştir. T+B1'e T+B0 uygulamasında MAE 103 genotipinde en fazla azalma %29 oranında, MAE 45 genotipinde en fazla artış %16 oranında T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. **Cl**

konsantrasyonları ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde T+B1 uygulamasında; MAE 45 genotipinde T+B0 uygulamasında istatistiki bakımdan önemli fark olduğu belirlenmiştir. Mısır genotiplerinde gövdeden **kaldırılan Cl miktarları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. Gövdeden kaldırılan Cl miktarları MAE 103 genotipinde T+B1'e göre T+B0, T+B2, T+B3 uygulamalarında sırasıyla %37 %8 ve %21 oranlarında azalırken; MAE 45 genotipinde T+B1'e göre T+B0, T+B2, T+B3 uygulamalarında sırasıyla %6, %33 ve %18 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. GxTxB interaksiyonunda gövdeden **kaldırılan en yüksek Cl miktarı** MAE 45 genotipinde T+B2 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 45 genotipinde T+B1'e göre T+B2 uygulamasında en fazla artış %33 oranında olduğu belirlenmiştir. **Cl konsantrasyonlarına** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde T+B1 ve T+B2 uygulamaları arasında; MAE 45 genotipinde T+B2 ve T+B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.

Mısır genotiplerinin **B konsantrasyonları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinin B konsantrasyonları T+B1'e göre T+B0 uygulamasında sırasıyla %9 ve %4 oranlarında azalırken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %399 ile %475 ve %3057 ile %3537 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. GxTxB interaksiyonunda en yüksek **B konsantrasyonları** MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B4 uygulamasından elde edilmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1'e T+B4 uygulamasında sırasıyla %3057 ve %3537 oranlarında olduğu belirlenmiştir. **B konsantrasyonları** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde T+B1 ve T+B0 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir. Mısır genotiplerinde gövdeden **kaldırılan B miktarları** tuz stresi koşullarında (T+B1) bor uygulamalarına bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. MAE 103 ve MAE 45 genotiplerinde gövdeden kaldırılan B miktarları sırasıyla T+B1'e göre T+B0 uygulamasında %19 ve %12 oranlarında azalırken; T+B2 ve T+B3 uygulamalarında sırasıyla %512 ile %1574 ve %3823 ile %3753 oranlarında artış gösterdiği belirlenmiştir. GxTxB interaksiyonunda gövdeden **kaldırılan en yüksek B miktarı** MAE 103 genotipinde T+B4 uygulamasından elde edilmiştir. T+B1'e göre T+B4 uygulamasında MAE 103 genotipinde %3823 oranında artış gösterdiği belirlenmiştir. **B konsantrasyonlarına** ait yapılan LSD testine göre MAE 103 genotipinde T+B3

uygulamasında istatistiki bakımdan önemli fark olduğu belirlenmiştir. MAE 45 genotipinde T+B2 ve T+B3 uygulamaları arasında istatistiki bakımdan fark olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.16. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda bor uygulamalarının mısır genotiplerinin kaldırılan Na , Cl ve B miktarları üzerine etkisi

Çalışmamızda mısır genotiplerinin gövde Na, Cl ve B konsantrasyonları ile gövdeden kaldırılan Na, Cl ve B miktarları B2, B3, T+B2 ve T+B3 uygulamalarında artarken, B0 ve T+B0 uygulamalarında azalmalar gösterdiği tespit edilmiştir. Uygulamalardaki bu azalmalarda yetersiz B durumunda bitki hücresindeki iyon dengesinin bozulmasıyla besin elementlerinin alımını ve bunların hücre içinde işlevlerini etkileyebilir. Ayrıca bitkilerde tuz stresi nedeniyle oluşan iyon toksisitesi hücre içersinde Na ve Cl iyonlarının birikimini, besin elementlerinin alımını ve taşınımını engelleyerek iyon dengesizliğine yol açabilmektedir. Farklı bitki dokularında yüksek Na ve Cl iyonlarının birikmesiyle beslenme dengesizliklerinin neden olduğunu bildirmişlerdir (Farooq ve ark.,2015). Tuz stresi koşullarında bitkiler stomalarını kapatarak su kaybını azaltmasıyla CO₂ alımında azaltır ve fotosentezi olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Gövdeden kaldırılan Na, Cl ve B miktarları ve konsantrasyonlarındaki artışlar tuz stresi nedeniyle bitki hücresinin metabolizması değişimine neden olabilmektedir. Ancak yeterli B koşullarında artış göstermesinde bor elementinin hücre çeperinin oluşumunda görev almasından kaynaklanabilir.

Uygulamalarda kaldırılan B miktarları ve konsantrasyonlar MAE 103 genotipinde MAE 45 mısır genotipinde daha yüksek oranlarda olması stres üzerinde olumlu etki yapabilir. Bu yüksek oranlardaki B konsantrasyonları MAE 103 genotipinin bor toksisitesine toleranslı ve tuz stresine dayanıklı genotip özelliğinden kaynaklanabilir. Bu durumda, bitkinin hücresel bütünlüğünü sürdürebilmesi için önemli bir elementin B olmasının yanında tuz stresi koşullarında bitki bünyesine daha fazla bor alarak stresi tolere edebilir. B3 uygulamalarında mısır genotiplerinin kökleri tarafından daha fazla B alarak bitkinin yapraklarındaki bor içeriğini artırabilir. B, hücre duvarı ve membranların yapısal ve işlevsel bütünlüğü, membranlar boyunca iyon akışlarında (H^+ , K^+ , PO_4^{3-} , Rb^+ , Ca^{2+}), azot ve karbonhidrat metabolizmasında, hücre iskeleti proteinleri ve plazmalemmaya bağlı enzimler, nükleik asit, indoleasetik asit, askorbik asit ve fenol metabolizmasında görev alabilmektedir (Shireen ve ark., 2018). Bitkilerde bor hücre zarlarının yapısında yer alması nedeniyle Na ve Cl geçirgenliğini düzenlemesinde, alımında ve taşınımında etkileşimde bulunarak seviyelerinde artışa neden olabilir. Tuz stresi koşullarında mısır genotiplerinin özellikle Na ve Cl içerikleri artış gösterirken bor uygulandığında bu içeriklerin azalma gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum genotipler arasında farklılıklarını ortaya koymuştur. Tuz stresi koşullarında MAE 103 genotipinin Na, Cl ve B konsantrasyonları ve kaldırılabilen miktarlarda daha fazla artış göstermesi MAE 45 genotipine göre tuz stresi toleransını daha fazla sağlamış olabilir. Cao ve ark. (2023), yüksek Na ve Cl konsantrasyonuna adaptasyonlarda, kök dokusunda alımını azaltırken, kökten çıkışını artırır ve böylece kökten gövdeye taşınımı engelleyerek gövdede Na ve Cl birikimini azaltmaktadır. Ancak sitozolik iyon konsantrasyonunu azaltmak için Na ve Cl vakuolde ayırarak iyon toksisitesine daha toleranslı olan gövde ve yapraklardan sağlayabildiğini bildirmişlerdir. Tuz stresi koşullarında (0, 3, 6, 9 ve 12 dS m⁻¹) mısır melezlerine (A6659 ve P1316) artan tuz dozlarında B içeriklerinde artışlar olduğu belirlenmiştir (Vennam ve ark., 2024). Ayrıca bor, diğer mineral elementlerle etkileşime girerek çeşitli fizyolojik ve biyokimyasal süreçleri etkilemektedir (Tarık ve Mott, 2007). Bulgularımıza paralel olarak, mısır bitkisine artan dozlarda bor uygulandığında Na, Cl ve B konsantrasyonlarında artışlar meydana geldiği belirlenmiştir (Martinez-Ballesta ve ark., 2008). Na, mısır bitkisi için toksik bir element olmasının yanında potasyum alımını ve taşınmasını engelleyerek stoma yapısında bozulmaya yol açarak su kaybına ve nekrozlara neden olduğunu bildirmişlerdir (Fortmeier ve Schubert , 1995 ; Sümer ve ark, 2004). Bitkilerde tuz stresi ozmotik dengeyi ve iyon alımını etkilemesiyle bitkinin su ve besin alımını önemli

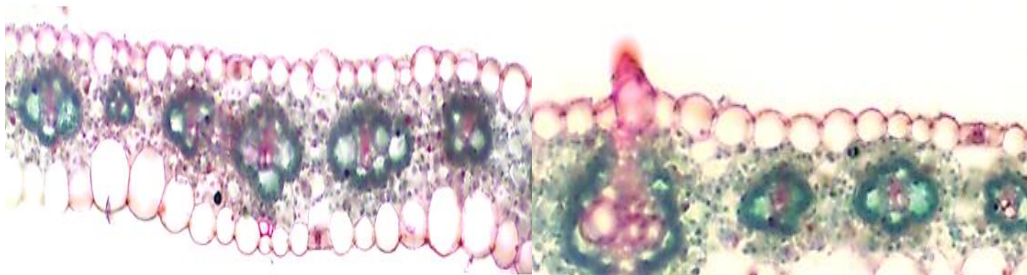
ölçüde kısıtlamaktadır (Khan ve ark., 2012;Ahmed ve ark., 2015).

Araştırmamıza paralel olarak yerel mısır (*L.amylacea*) çeşidine hidroponik ortamda tuz stresi(430 mM NaCl) koşullarında bor (3.6 mM H_3BO_3) uygulamasıyla bitkinin tolerans mekanizması üzerine etkileri incelenmiştir. Tuz stresi koşullarında bor uygulandığında Na, Cl ve B konsantrasyonlarında kontrole göre artış gösterirken, tuz stresi koşullarına göre azalmalar olduğu belirlenmiştir (Martinez-Ballesta ve ark., 2008). Benzer olarak, sera koşullarında (*Zea mays L. amylacea*) mısır bitkisinin tolerans mekanizmalarını incelemek amacıyla tuz dozları (100 mM ve 430 mM NaCl) ve H_3BO_3 (2 mM ve 4 mM B) uygulanmıştır. Tuz stresi koşullarında mısır bitkisinin yapraklarında kontrole göre Na ve B içeriklerinde artışlar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tuz stresi koşullarında(100 mM NaCl) 4 mM B uygulamasında B içeriğinde artış gösterdiği tespit edilmiştir (Bastías, González-Moro ve González-Murua., 2004).

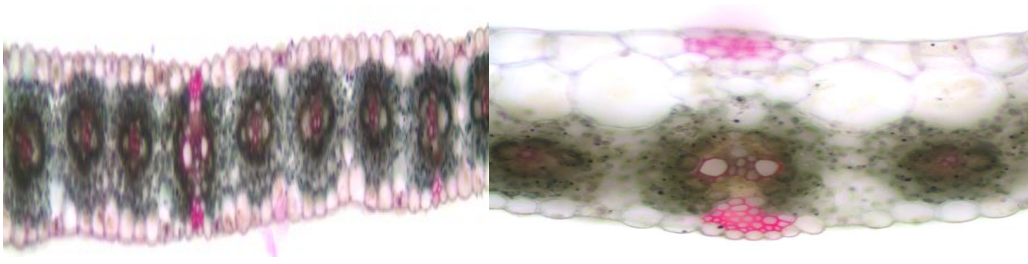
4.6. Anatomik Bulgular

Tuz stresi (150 mM NaCl) koşullarında bor uygulamalarının (0 mM B, 0.50 mM B ve 4 mM B) mısır genotiplerinin yaprak anatomik yapılarında meydana getirdiği değişimler mikroskop görüntüleri ışığında incelenmiştir. Anatomik çalışmalarının sonuçları ve mikroskopta çekilen fotoğrafları aşağıda verilmiştir. Kesitlerin ölçülerine ilişkin, fotoğraflara ait mikroskop büyötmeleri (X10 ve X20) olarak şekillerin yanında verilmiştir.

Çalışmamızda MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin B1 (kontrol) uygulamalarından elde ettiğimiz anatomik kesit örnekleri genel yaprak kesitine ait özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Ancak MAE 103 mısır genotipinin yaprak kesiti örneklerine göre MAE 45 mısır genotipine ait kesitlerde ana damar destek dokusu olan sklerankima alt ve üste daha geniş bir alanı kaplamaktadır.

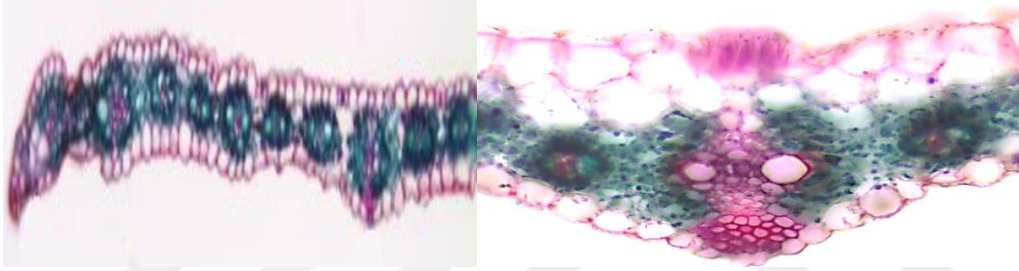


Resim 4.1. B1 (kontrol) uygulamalarında MAE 103 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

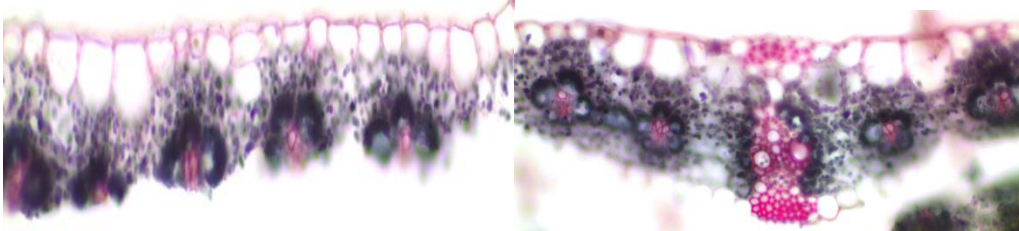


Resim 4.2. B1 (kontrol) uygulamalarında MAE 45 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

Çalışmamızda MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin B2 uygulamalarından elde ettiğimiz anatomik kesitte yaprak alt epidermisinde yer alan çeperleri kalınlaşmış olan sklerankima hücreleri oldukça belirgin olup benzer ölçülerde alanı kaplamaktadır.

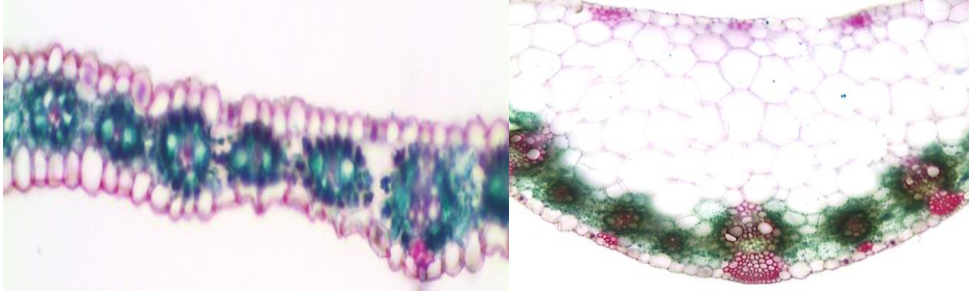


Resim 4.3. B0 (yetersiz B) uygulamalarında MAE 103 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)



Resim 4.4. B0 (yetersiz B) uygulamalarında MAE 45 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

Çalışmamızda MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin B3 uygulamalarından elde ettiğimiz anatomik kesitte yaprak alt epidermisinde yer alan çeperleri kalınlaşmış olan sklerankima hücreleri oldukça belirgin olup benzer ölçülerde alanı kaplamaktadır.

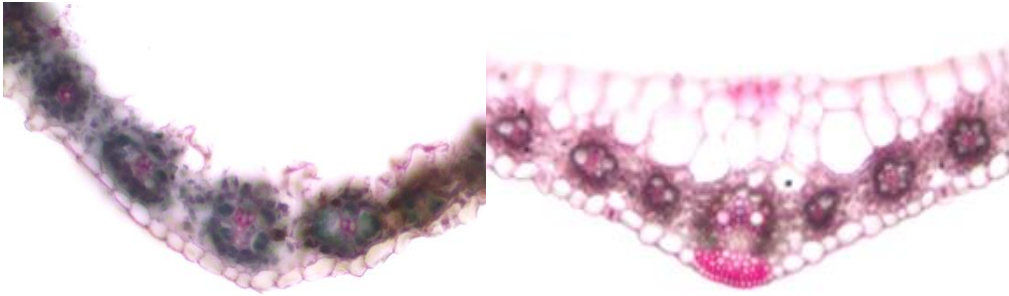


Resim 4.5. B2 (yeterli B) uygulamalarında MAE 103 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

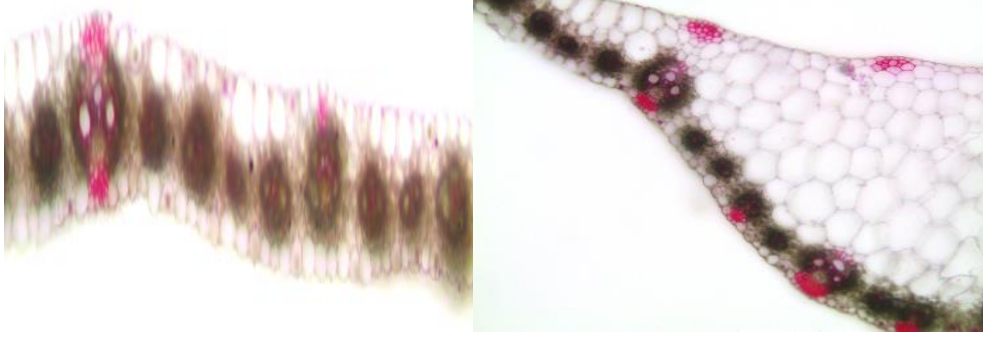


Resim 4.6. B2 (yeterli B) uygulamalarında MAE 45 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

Çalışmamızda MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin B4 uygulamalarından elde ettiğimiz anatomik kesitte yaprak alt epidermisinde yer alan çeperleri kalınlaşmış olan sklerankima hücreleri oldukça belirgin olup benzer ölçülerde alanı kaplamaktadır.

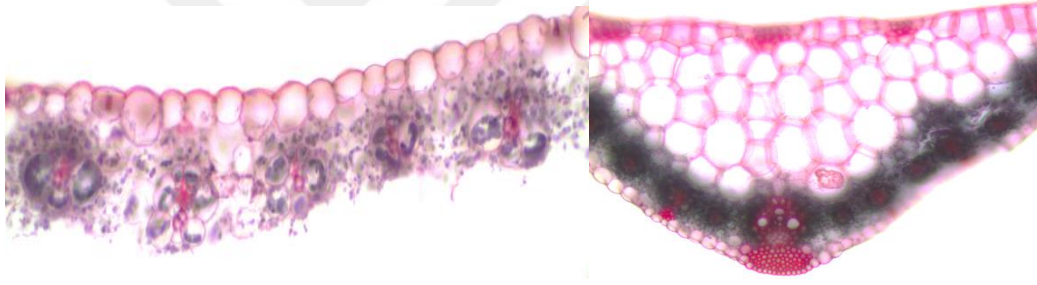


Resim 4.7. B3 (toksik B) uygulamalarında MAE 103 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

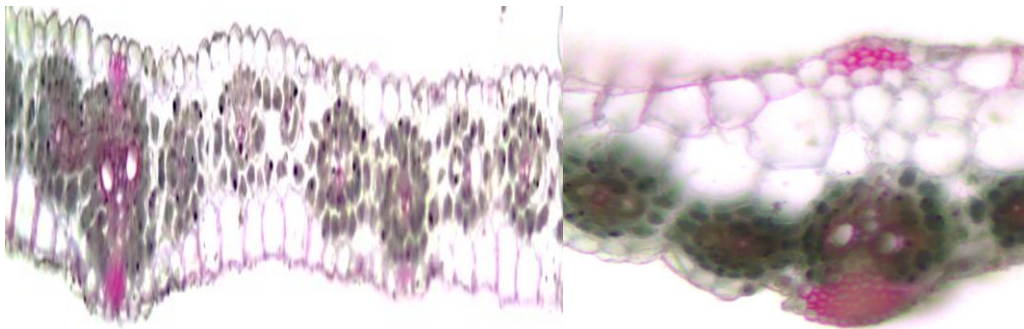


Resim 4.8. B3 (toksik B) uygulamalarında MAE 45 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

Çalışmamızda MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin tuz stresi koşullarında (T+B1) elde ettiğimiz anatomik kesit örnekleri incelendiğinde yaprak enine kesitlerinde alt epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin daha kalın oldukları tespit edilmiştir

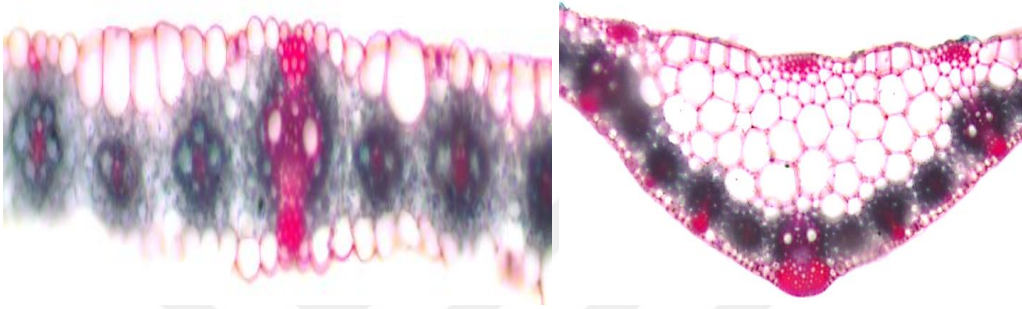


Resim 4.9. T+B1 uygulamalarının MAE 103 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

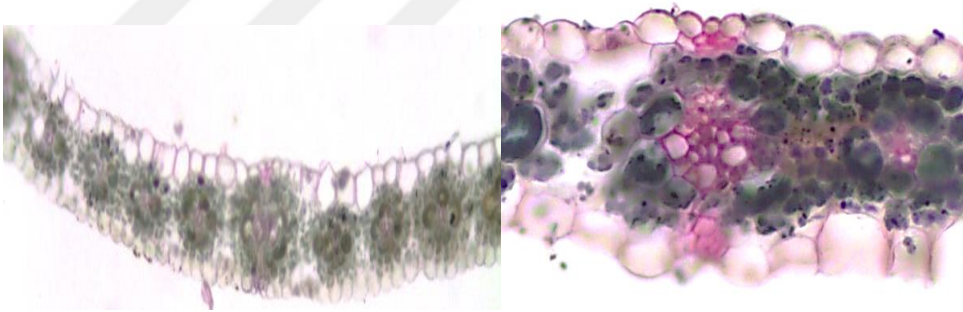


Resim 4.10. T+B1 uygulamalarının MAE 45 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

Çalışmamızda MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin tuz stresi koşullarında yetersiz B (T+B2) uygulamalarından elde ettiğimiz anatomik kesit örnekleri incelendiğinde yaprak enine kesitlerinde alt epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin daha kalın oldukları tespit edilmiştir. Ayrıca uygulamalara bağlı olarak yaprak epidermis hücrelerinin büyüklükleri benzer olmakla beraber T+B2 uygulamasında mısır genotiplerinin yaprak kesitlerinin üst epidermis hücreleri daha büyük ölçülerde olduğu belirlenmiştir.

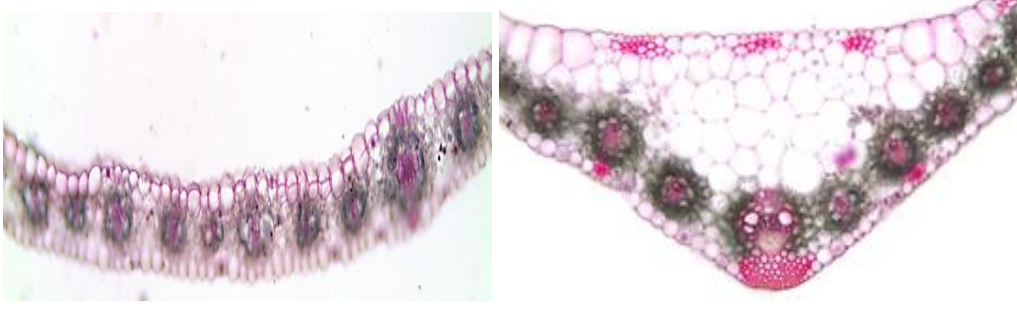


Resim 4.11. T+B0 uygulamalarının MAE 103 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

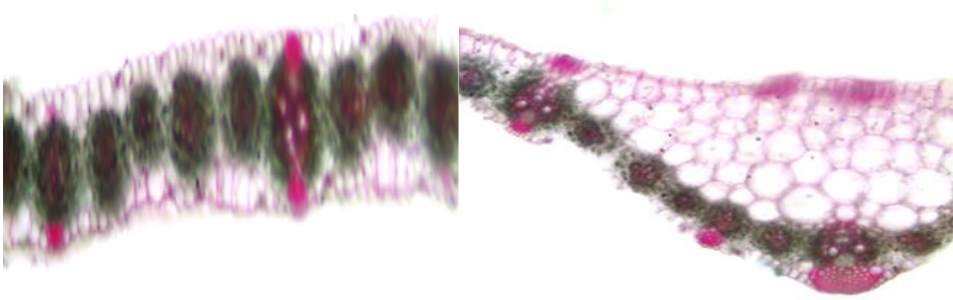


Resim 4.12. T+B0 uygulamalarının MAE 45 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

Çalışmamızda MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin tuz stresi koşullarında B3 uygulamalarından (T+B3) elde ettiğimiz anatomik kesit örnekleri incelendiğinde bitkiler kontrole göre üst epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin daha kalın oldukları belirlenmiştir.

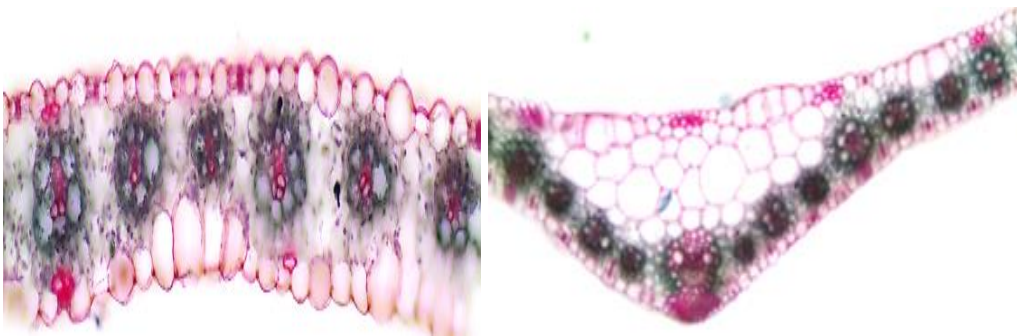


Resim 4.13. T+B2 uygulamalarının MAE 103 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

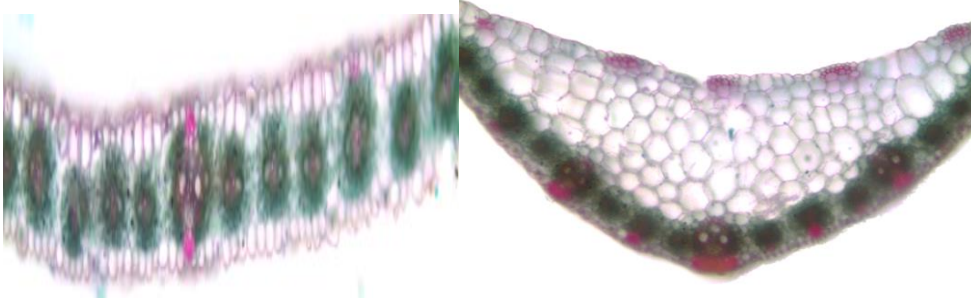


Resim 4.14. T+B2 uygulamalarının MAE 45 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

Çalışmamızda MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin tuz stresi koşullarında B4 uygulamalarından (T+B4) elde ettiğimiz anatomik kesit örnekleri incelendiğinde bitkilerin kontrole göre üst epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin daha kalın oldukları belirlenmiştir.



Resim 4.15. T+B3 uygulamalarının MAE 103 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)



Resim 4.16. T+B3 uygulamalarının MAE 45 mısır genotipine ait yaprak enine kesitleri (x10, x20)

Tuz stresi koşullarında ve tuzxbor interaksiyonlarında MAE 103 ve MAE 45 mısır genotiplerinin yaprak kesitleri incelendiğinde ana damara ait kısım hariç mezofil dokusu kesitte oldukça dar bir alanı kaplamaktadır. Ayrıca kontrolde mezofil dokusu dar bir alanda yer alırken, T+B2 ve T+B3 yaprak enine kesitleri mezofil kısmının biraz daha geniş olması ile farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Mezofilde palizat ve sünger ayırımı tüm örneklerde çok net olmayıp kısmen seçilmektedir. MAE 103 mısır genotipinin yaprak alt epidermisinde yer alan çeperleri kalınlaşmış olan sklerankima hücreleri tüm uygulamalarda oldukça belirgin olup benzer ölçülerde alan kaplamaktadır. Ancak MAE 45 mısır genotipinin yaprak alt epidermisin de yer alan çeperleri kalınlaşmış olan sklerankima hücreleri B1, B0 ve T+B1 uygulamaların da daha geniş bir alana yayıldığı belirlenmiştir. Bor uygulamalarında mısır genotiplerinin alt epidermisinde yer alan çeperlerinde sklerankima hücreleri kalınlaşırken, tuz stresi koşullarında üst epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin daha kalın oldukları belirlenmiştir. Bu durum tuz stresinden kaynaklı su kaybını azaltabilmek için adaptasyon sağlayabilir. Yaprakların epidermal yüzeyindeki kutikula tabakalarından terlemeyi önleyerek bitkilerin tuz stresinden kaynaklanan su eksikliğinin üstesinden geldiğini bildirmişlerdir (L. Liu ve ark., 2022). Anatomik bulgularımıza benzer olarak, yetersiz bor, kök morfolojisinde değişikliklere yol açarak yaprak/kök oranında artışa veya selüloz, amino asitler, fenoller ve lignin birikimine bağlı olarak kökün hücre duvarı kütlesinde kalınlaşmaya neden olmaktadır (García-Sánchez ve ark., 2020). Bor bitkinin yaşamsal döngülerinde gerekli iken yetersiz ve toksik B durumlarında bitkilerin gövde boylarında büyümeyi sınırlandırarak bitkinin gövde büyümesini ve gelişimini azalmasına neden olabilir. Bor bitkilerin hücre duvarlarının güçlendirilmesinde ve hücre zar yapılarının korunmasında rol oynadığı bildirmişlerdir (Osakabe ve ark., 2014) Yetersiz bor, kök morfolojisinde değişikliklere yol açarak yaprak/kök oranında artışa

veya selüloz, amino asitler, fenoller ve lignin birikimine bağı olarak kökün hücre duvarı kütlesinde kalınlaşmaya neden olmaktadır (García-Sánchez ve ark., 2020).

Çalışmamıza benzer olarak, Hamurcu ve ark. (2016) hidroponik ortamda mısır çeşitlerine (bor toksisitesine toleranslı RX 770 ve hassas TTM 81.19) artan dozlarda kontrol (0.033 mM), 0.25, 2.5, 5 ve 10 mM B bor uygulandığında gövde anatomisinde meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla yapılmıştır. Mısır çeşitlerinde mezofil hücre çaplarının bora toleranslı RX 770 çeşidinde artan bor dozlarına bağı olarak kontrole göre daha az oranda değişim gösterdiği, bor toksisitesine hassas TTM 81.19 çeşidinde ise bor dozundaki artışa bağı olarak mezofil hücre çaplarında azalmalar gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, bitkide mezofil hücrelerinde meydana gelen bozulmalar sonucunda büyümenin gerilediği ve ksilem dokusunda düzensiz dağılmalar olduğunu bildirmişlerdir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Tuz stresi, bitkilerin büyümesini, gelişmesini, verimini ve kalitesini olumsuz yönde etkileyen en önemli abiyotik stres faktörlerinden biridir. Tuz stresi, bitkilerde morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal, anatomik ve moleküler düzeyde pek çok değişiklikler meydana gelmektedir. Bitkilerin gelişim dönemlerinde tuz stresi metabolik süreçleri etkileyerek bitkide turgor kaybına, fotosentez hızında azalmalara, iyonik dengenin ve hücrenin işlevselliğinin bozulmasına neden olmaktadır. Günümüzde tuz stresinin bitkiler üzerindeki olumsuz etkilerini azaltılması için çalışmalar devam etmektedir. Bor bitkilerin büyümesi ve gelişmesi için gerekli bir besin elementi olmasının yanında hücre duvarının sağlamlılığı ve esnekliğini korumada önemli roller üstlendiği bilinmektedir. Bu nedenle tez çalışmamızda tuz stresi koşullarında bor uygulamalarının mısır bitkisinin gelişimi ve tolerans mekanizması üzerine etkisinin belirlenmesi ve açıklanması amaçlanmıştır. Çalışmamız, tuz stresi(150 mM NaCl) koşullarında bor uygulamalarının B1, B0, B2 ve B3 (0.033 mM B, 0 mM B, 0.5 mM B ve 4 mM B) mısır genotiplerinde meydana getirdiği değişimler fizyolojik ve biyokimyasal parametrelere bakılarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda;

Tuz stresi koşullarında yetersiz B uygulamasında mısır genotiplerinin SOD ve GSSG içeriği artarken, POX, APX, CAT, GR ve GSH içerikleri diğer B uygulamalarına göre azalmalar gösterdiği belirlenmiştir. Bu koşullarda bitkide H_2O_2 ve OH içeriklerinde meydana gelen artış hücre membrallarının geçirgenliğinin bozulmasına, Ca, Mg, Na ve B konsantrasyonlarının düşmesi nedeniyle bitkinin kök boyu, gövde boyu, yaş ve kuru ağırlıklarında azalmalar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tuz stresi koşullarında yetersiz B uygulamaları bitkide anatomik değişimlere neden olarak alt epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin daha fazla kalınlaştırarak bitkinin su kaybını en az düzeyde tutmayı sağladığı tespit edilmiştir. Tuz stresi koşullarında yetersiz B uygulamasında MAE 103 (B toksisitesine toleranslı ve tuza dayanıklı) mısır genotipinin SOD enzim aktivitesini artırırken, CAT, GR ve GSH içeriklerinde azalmalar diğer B uygulamalarına göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum bitkinin B içeriğini azaltarak diğer besin elementleriyle rekabete girmesine Na ve Cl konsantrasyonlarının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bitkinin EC, MDA ve H_2O_2 içeriklerinin artması hücre membranlarında oksidatif hasarlanmalara neden olarak bitkinin üst

epidermis hücrelerinin büyümesine ve alt epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin daha da kalınlaşmasıyla anatomik yapıların bozulduğu tespit edilmiştir. Tuz stresi koşullarında yetersiz B uygulamasında MAE 45 (B toksitesine toleranssız ve tuza dayanıksız) mısır genotipinin GSSG içeriği artarken, POX ve APX enzim aktiviteleri diğer B uygulamalarına göre daha fazla azalmalar gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum bitkide Cl konsantrasyonunun artması, Ca ve Mg konsantrasyonlarının azalması iyon dengesizliğine ve bitkinin üst epidermis hücrelerinin büyümesine neden olduğu tespit edilmiştir.

Tuz stresi koşullarında toksik B uygulaması ile mısır genotiplerinin CAT enzim aktivitesi daha fazla artarken; SOD, GSSG, EC, MDA, H₂O₂ ve prolini içeriklerindeki azalmalar diğer B uygulamalarına göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum bitkide B toksik etkisi hücre duvarının yapısal bütünlüğünün bozulmasına bitkinin üst epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin kalınlaştırarak ve mezofil dokularını genişleterek anatomik yapılarında bozulmalar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bitkide özellikle K içeriklerinin azalması iyon dengesizliğine neden olarak RWC içeriklerindeki değişimlere bağlı olarak hücre içindeki ve hücre dışındaki su dengesini koruyamadığı belirlenmiştir. Tuz stresi koşullarında toksik B uygulaması MAE 103 (tuza dayanıklı) mısır genotipinde CAT enzim aktivitesini daha fazla artırarak, GSSG içeriği diğer B uygulamalarına göre azalmalar olduğu belirlenmiştir. Bu durumun bitkide MDA ve OH radikallerinde azalmalara neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bitkide B ve Mg konsantrasyonlarını artırırken, K konsantrasyonlarını azaltarak bitki hücresindeki su dengesinde bozulmalar olduğu belirlenmiştir. Bitki hücresinde meydana gelen bu değişimler yaprak alt epidermisinde yer alan sklerankima hücrelerinin çeperlerini kalınlaşmalar olduğu belirlenmiştir. Tuz stresi koşullarında toksik B uygulaması MAE 45 (tuza dayanıksız) mısır genotipinin POX ve GSH içerikleri artarken, SOD enzim aktivitesi diğer B uygulamalarına göre azalmalar olduğu belirlenmiştir. Bu durum bitkide OH radikallerinin artmasına ve hücre duvarlarının yapısında yer alan prolinin azalmasıyla bitki dokularında hasarlanmalar meydana getirmiştir. Ayrıca bitkide Na konsantrasyonu artarken, K konsantrasyonunun azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum bitkide Na/ K dengesinin bozulmasıyla Na'un bitki hücresinin plazma zarlarından emilimi için K ile rekabete girerek iyon dengesizliklerine ve hücrenin mezofil dokularında genişlemelere neden olarak anatomik yapılarında değişimler meydana getirmiştir.

Tuz stresi koşullarında yeterli B uygulaması mısır genotiplerinin POX, CAT, APX, GR ve GSH antioksidan enzim aktiviteleri diğer B uygulamalarına göre daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durum bitkide yeterli B seviyesinde MDA, H₂O₂ ve OH radikallerinde azalmalara neden olarak bitkinin tuza toleranslılık düzeyinde hücresel zararlanmaları ve ROT birikimlerini engelleyerek hücrenin yapısını koruyabildiği belirlenmiştir. Ayrıca mısır genotiplerinin üst epidermis hücrelerini kaplayan kutikula enlerinin daha fazla kalınlaşması ve mezofil dokularının genişlemesi bitkinin su kaybını azaltarak tuz stresine karşı tolerans sağlayabilmiştir. Bitkinin epidermis hücrelerinde meydana gelen bu değişimler Ca ve Mg konsantrasyonlarını artırarak kök ve gövde kuru ağırlıklarını artırdığı tespit edilmiştir. Tuz stresi koşullarında yeterli B uygulaması MAE 103 (tuza dayanıklı) mısır genotipinde APX ve GR enzim aktivitelerini diğer B uygulamalarına göre daha fazla artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum bitkide MDA ve OH radikallerinin azalmasına hücre membranlarındaki hasarlanmaları ve ROT birikimlerinin azaltarak hücreyi oksidatif stresin etkilerinden koruyabildiği belirlenmiştir. Ayrıca bitkide Ca ve Mg konsantrasyonlarının artması, Na ve Cl konsantrasyonlarının azalması katyonlar arasındaki dengede hücrelerin geçirgenliğini sağlayabildiği belirlenmiştir. Bitkide hücrenin bu geçirgenliğini yaprak üst ve alt epidermisinde yer alan çeperlerin kalınlaşmasının yanında mezofil dokularının genişlemesiyle sağladığı belirlenmiştir. MAE 103 mısır genotipinde meydana gelen bu değişimler tuz stresine karşı tolerans sağlamada daha etkili olabileceği tespit edilmiştir. Tuz stresi koşullarında yeterli B uygulaması MAE 45 (tuza dayanıksız) mısır genotipinde POX, CAT, GR ve GSH içerikleri diğer B uygulamalarına göre artarken, SOD enzim aktivitesinde artış göstermediği belirlenmiştir. Bu durum bitkide EC, OH ve H₂O₂ içeriklerini azaltarak hücreden serbest radikallerin oluşumlarının azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bitkide Ca, Na ve Cl içeriklerinin artmasına, Mg ve K konsantrasyonlarının azalmasıyla bitki hücrelerinde osmotik dengesizliğe ve su dengesinin bozulmasıyla mezofil dokularının genişlemesine neden olduğu belirlenmiştir. MAE 45 mısır genotipinde meydana gelen bu değişimler tuz stresine karşı dayanıksız olduğu belirlenmiştir.

Tez çalışma sonuçlarından elde edilen bu verilere dayanılarak tuz stresi koşullarında yeterli seviyede B uygulaması genotiplere göre değişim gösterirken bitkinin gelişimi, morfolojik, fizyolojik, biyokimyasal ve anatomik yapılarında

iyileştirici yönde etkisinin olduğu belirlenmiştir. Tuzlu ve tuzsuz koşullarda yeterli B uygulamasında MAE 103 mısır genotipinin antioksidan enzim aktivitelerinde daha fazla artış gösterdiği belirlenmiştir. Çalışma sonucunda MAE 103 (B toksisitesine toleranslı ve tuza dayanıklı) ve MAE 45 (B toksitesine toleranssız ve tuza dayanıksız) tuz toleranslılıkları belirlenen mısır genotiplerin ıslah çalışmaları için bitki materyali olarak kullanılması ve yeni çeşitlerin geliştirilmesi açısından önemlidir. Tuz stresi koşullarında bitkilere bor uygulamalarının fizyolojik boyutu hakkında elde edilen bu bilgiler bitki besleme çalışmalarına ışık tutacaktır. Ayrıca tuz stresine dayanıklı bu genotiplerin genlerinin moleküler düzeyde tanımlanması klasik ıslah yöntemlerinde ve genetik mühendisliği alanlarında gen havuzlarının oluşturulması açısından önemlidir.



KAYNAKLAR

- Ahmed, Khalil. Salinity and Boron interaction in Maize. University Of Agriculture, Faisalabad Pakistan, 2011. <http://pr.hec.gov.pk/jspui/handle/123456789/235>
- Ahmad, W., Niaz, A., Kanwal, S., & Khalid, M. (2009). Role of boron in plant growth: a review. *Journal of agricultural research*, 47.
- Ahanger, M. A., Tomar, N. S., Tittal, M., Argal, S., & Agarwal, R. M. (2017). Plant growth under water/salt stress: ROS production; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. *Physiology and molecular biology of plants : an international journal of functional plant biology*, 23(4), 731-744. doi:10.1007/s12298-017-0462-7
- Akram, M., Ashraf, M., Ahmad, R., M. R., Ahmad, I., & Iqbal, J. (2010). Allometry and yield components of maize (*Zea Mays* L.) hybrids to various potassium levels under saline conditions. *Archives of Biological Sciences*, 62, 1053-1061. doi:10.2298/ABS1004053A
- Alharby HF, Nahar K, Al-Zahrani HS, Hakeem KR, Hasanuzzaman M. Ekzojen Bor ile Soya Fasulyesinde Tuz Toleransının Arttırılması: Askorbat-Glutatyon ve Glioksalaz Yollarının İçsel Çalışması. *Bitkiler* . 2021; 10(10):2085. <https://doi.org/10.3390/plants10102085>
- Algan, G., 1981, Bitkisel dokular için mikroteknik, Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi, p.
- Altunlu, H. (2020). Tuz Stresi Altındaki Biberde (*Capsicum annuum* L.) Mikoriza ve Rizobakteri Uygulamasının Bitki Gelişimi ve Bazı Fizyolojik Parametreler Üzerine Etkisi. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 57(4), 501-510. DOI: 10.20289/zfdergi.655491
- André, D., José Tarquinio, P., Joaquim, E.-F., Carlos Eduardo Braga de, A., & Enéas, G.-F. (2006). Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. *Environmental and Assaha, D. V., Ueda, A., Saneoka, H., Al-Yahyai, R., & Yaish, M. W. (2017). The role of Na⁺ and K⁺ transporters in salt stress adaptation in glycophytes. Frontiers in Physiology*, 8, 509.
- Azooz, M., Ismail, A., & Elhamd, M. (2009). Growth, Lipid Peroxidation and Antioxidant Enzyme Activities as a Selection Criterion for the Salt Tolerance of Maize Cultivars Grown under Salinity Stress. *International Journal of Agriculture and Biology*, 11. *experimental botany*, 56(1), 87-94. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.01.008>
- Barut H., Aykanat S., Aşıklı S., EKER S. (2018) Bitkisel Üretimde Bor , Uluslararası Doğu Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi, 1(1): 33-46.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. ve Tear, I. D., 1973, Rapid determination of free prolin for water-stress studies Plant and Soil, 39, 205-207.
- Beauchamp, C. ve Fridovich, I., 1971, Superoxide dismutase: Improved Assays and Applicable to Acrylamide Gels, *Analytical Biochemistry*, 44, 276-287.
- Bergmeyer, H. U., 1970, Methoden der enzymatischen Analyse. Bd 2, Vlg. Chemie, p.
- B., Mehera., Sanjay, Kumar. (2023). Effect of Boron on Growth and Yield of Sweet Corn (*Zea mays* L. Saccharata) Varieties. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(6):1-6. doi: 10.9734/ijecc/2023/v13i61792.
- B R, A., Thippeshappa, G. N., Mc, A., & Km, P. (2018). Boron: A critical micronutrient for crop growth and productivity. 2738-2741.
- Balasubramaniam, T., Shen, G., Esmaceli, N., & Zhang, H. (2023). Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress. *Plants*, 12(12), 2253. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/12/2253>
- Bastías, E. I., González-Moro, M. B., & González-Murua, C. (2004). *Zea mays* L. amylacea from the Lluta Valley (Arica-Chile) tolerates salinity stress when high levels of boron are available. *Plant and soil*, 267(1/2), 73-84. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42951651>
- Benavente, L., Kernodle, S., Margis-Pinheiro, M., & Scandalios, J. (2004). Salt-induced antioxidant metabolism defenses in maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Redox report : communications in free radical research*, 9, 29-36. doi:10.1179/135100004225003888
- Billah, M., Rohman, M., Hossain, N., & Uddin, M. S. (2017). Exogenous ascorbic acid improved tolerance in maize (*Zea mays* L.) by increasing antioxidant activity under salinity stress. *African journal of agricultural research*, 12(17), 1437-1446.
- Blevins, D. G., & Lukaszewski, K. M. (1998). Boron in plant structure and function. *Annual review of plant biology*, 49(1), 481-500.
- Bonilla, I., El-Hamdaoui, A., & Bolaños, L. (2004). Boron and calcium increase *Pisum sativum* seed germination and seedling development under salt stress. *Plant and soil*, 267(1), 97-107.
- Bonilla, I., & González-Fontes, A. n. (2011). Salt Stress in Vascular Plants and Its Interaction with Boron Toxicity.

- Bradford, M. M., 1976, A rapid and sensitive method for the quantitaon of microgram quantities of protein utiizing the prenciple of protein-dye binding, *Analitical Biochemistry*, 72, 248-254.
- Brdar-Jokanović, M. (2020). Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1424. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/4/1424>
- Brown, P. H., Bellaloui, N., Wimmer, M., Bassil, E. S., Ruiz, J., Hu, H., . . . Römheld, V. (2002). Boron in plant biology. *Plant Biology*, 4(02), 205-223.
- Cai, Z., Feng, K., Li, X., Yan, H., Zhang, Z., & Liu, X. (2019). Pre-breeding: the role of antioxidant enzymes on maize in salt stress tolerance. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(6), 102. doi:10.1007/s11738-019-2880-3
- Cakmak, I., Kurz, H., & Marschner, H. (1995). Short-term effects of boron, germanium and high light intensity on membrane permeability in boron deficient leaves of sunflower. *Physiologia plantarum*, 95(1), 11-18.
- Camacho-Cristóbal, J. J., Herrera-Rodríguez, M. B., Beato, V. M., Rexach, J., Navarro-Gochicoa, M. T., Maldonado, J. M., & González-Fontes, A. (2008). The expression of several cell wall-related genes in Arabidopsis roots is down-regulated under boron deficiency. *Environmental and experimental botany*, 63(1-3), 351-358.
- Carpici, E. B., Celik, N., & Bayram, G. (2010). The effects of salt stress on the growth, biochemical parameter and mineral element content of some maize (*Zea mays* L.) cultivars. *African Journal of Biotechnology*, 9(41), 6937-6942.
- Chele, K. H., Tinte, M. M., Piater, L. A., Dubery, I. A., & Tugizimana, F. (2021). Soil Salinity, a Serious Environmental Issue and Plant Responses: A Metabolomics Perspective. *Metabolites*, 11(11). doi:10.3390/metabo11110724
- Chung, S., & Osawa, T. Kawakishi. 1997. Hydroxyl radical scavenging effects of spices and scavengers from brown mustard. *Biosci Biotech Biochem*, 61, 118-123.
- Chormova, D., & Fry, S. C. (2016). Boron bridging of rhamnogalacturonan-II is promoted in vitro by cationic chaperones, including polyhistidine and wall glycoproteins. *New Phytologist*, 209(1), 241-251.
- Corrales, I., Poschenrieder, C., & Barceló, J. (2008). Boron-induced amelioration of aluminium toxicity in a monocot and a dicot species. *Journal of Plant Physiology*, 165(5), 504-513. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.03.014>
- Çelik, H., Turan, M. A., Aşık, B. B., Öztüfekçi, S., & Katkat, A. V. (2019). Effects of Soil-Applied Materials on the Dry Weight and Boron Uptake of Maize Shoots (*Zea Mays* L.) Under High Boron Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(7), 811-826. doi:10.1080/00103624.2019.1589477
- Çullu, M., Kılıç, Ş., Akça, E., Aksoy, E., Bilgehan Aydın, G., Bilgili, A., . . . Kurucu, Y. (2015). *Türkiye'de Toprak Tuzlulaşmasından Etkilenen Alanlar (Çullu ve Ar.) ZMO Teknik Kongresi Bildirisi* 16.10.2014.
- DeliBoran, A., & Savran, Ş. (2015). [Soil Salinity and The Salt Resistance Mechanism of Plants]. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*(1), 57-61. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/derleme/issue/35094/389309>
- de Souza Júnior, J. P., de, M. P. R., Campos, C. N. S., Sousa Junior, G. S., Oliveira, K. R., Cazetta, J. O., & Grataão, P. L. (2022). Addition of silicon to boron foliar spray in cotton plants modulates the antioxidative system attenuating boron deficiency and toxicity. *BMC Plant Biol*, 22(1), 338. doi:10.1186/s12870-022-03721-7
- Dionisio-Sese, M. L. ve Tobita, S., 1998, Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress, *Plant Science*, 135 (1), 1-9.
- Doğru, A. (2019). Bitkilerde Antioksidan Sistemler ve Tuz Stresine Verdikleri Yanıtlar. [Antioxidant Systems in Plants and Responses to Salt Stress]. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 1(2), 164-185. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijeased/issue/47170/622925>
- Eggert, K., & von Wirén, N. (2017). Response of the plant hormone network to boron deficiency. *New Phytol*, 216(3), 868-881. doi:10.1111/nph.14731
- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K. ve diğerleri. Küresel mısır üretimi, tüketimi ve ticareti: eğilimler ve Ar-Ge çıkarımları. *Gıda Sec.* 14 , 1295–1319 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- Farhang-Abriz, S., & Nikpour-Rashidabad, N. (2017). Effect of lignite on alleviation of salt toxicity in soybean (*Glycine max* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 120, 186-193. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.10.007>

- Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A., & Siddique, K. H. M. (2015). Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 461-481. doi:10.1007/s13593-015-0287-0
- Foyer, C. H. ve Halliwell, B., 1976, The presence of glutathione and glutathione reductase in chloroplast: a proposed role in ascorbic acid metabolism, 133, 21-25.
- Francisco, G.-S., Silvia, S.-G., Juan, J. M.-N., Marina, A.-S., Chunguang, L., Chatzissavvidis, C., . . . José, M. C.-Z. (2020). Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122713. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122713>
- Funakawa, H., & Miwa, K. (2015). Synthesis of borate cross-linked rhamnogalacturonan II. *Frontiers in Plant Science*, 6, 223.
- Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A., & Siddique, K. H. M. (2015). Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 461-481. doi:10.1007/s13593-015-0287-0
- FAO (2021). The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4476e>
- Foyer, C. H., & Hanke, G. (2022). ROS production and signalling in chloroplasts: cornerstones and evolving concepts. *The Plant Journal*, 111(3), 642-661. doi:<https://doi.org/10.1111/tpj.15856>
- Francisco, G.-S., Silvia, S.-G., Juan, J. M.-N., Marina, A.-S., Chunguang, L., Chatzissavvidis, C., . . . José, M. C.-Z. (2020). Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122713. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122713>
- García-Sánchez, F., Simón-Grao, S., Martínez-Nicolás, J. J., Alfosea-Simón, M., Liu, C., Chatzissavvidis, C., . . . Cámara-Zapata, J. M. (2020). Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122713. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122713>
- Gezgin, S., Dursun, N., Hamurcu, M., Harmankaya, M., Önder, M., Sade, B., Topal, A., Soyulu, S., Akgün, N. ve Yorgancilar, M., 2002. Boron content of cultivated soils in central-southern Anatolia and its relationship with soil properties and irrigation water quality, *Boron in Plant and Animal Nutrition*, 391-400.
- Goldbach, H. E., & Wimmer, M. A. (2007). Boron in plants and animals: is there a role beyond cell-wall structure? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(1), 39-48.
- Goussi, R., Manaa, A., Derbali, W., Cantamessa, S., Abdelly, C., & Barbato, R. (2018). Comparative analysis of salt stress, duration and intensity, on the chloroplast ultrastructure and photosynthetic apparatus in *Thellungiella salsuginea*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 183, 275-287.
- Gökseven, Ş., Kiran, S., & Ellialtıoğlu, S. (2021). Determination of morphological and physiological changes of ornamental cabbage (*Brassica oleracea* var. *acephala*) against boron toxicity in phytoremediation. *Horticultural Studies*, 29-38. doi:10.16882/hortis.867761
- Guan, X. (2023). Glutathione and glutathione disulfide – their biomedical and pharmaceutical applications. *Medicinal Chemistry Research*, 32(9), 1972-1994. doi:10.1007/s00044-023-03116-9
- Güneş, A., Gezgin, S., Kalinbacak, K., Ozcan, H., & Çakmak, I. (2017). The Importance of boron for plants. *Bor Dergisi*, 2(3), 168-174.
- Hajiboland, R. (2012). Effect of Micronutrient Deficiencies on Plants Stress Responses. In P. Ahmad & M. N. V. Prasad (Eds.), *Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability* (pp. 283-329). New York, NY: Springer New York.
- Hajiboland, R., Bahrami-Rad, S., & Bastani, S. (2013). Phenolics metabolism in boron-deficient tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] plants. *Acta Biologica Hungarica*, 64, 196-206.
- Hamurcu, M., Harmankaya, M., Soyulu, S., Gökmen, F. ve Gezgin, S., 2006, Makarnalık Buğdayın (*Triticum durum* L.) Bazı Besin Elementleri Kapsamına Farklı Dozlarda Bor ve Demir Uygulamalarının Etkisi, *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 20 (38), 1-8.
- Hamurcu, M., Tamkoç, A., Gökmen, F., Gezgin, S., Özbek, Z., Babaoğlu, M., Hakkı, E.E., 2006 b. Farklı Bor ve Demir Uygulamalarının Bezelye Hatlarının Gelişimi Üzerine Etkisi. 3. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı s: 145-153. 02 -04 Kasım Ankara.
- Hamurcu, M., Sekmen, A. H., Turkan, İ., Gezgin, S., Demiral, T., & Bell, R. W. (2013). Induced anti-oxidant activity in soybean alleviates oxidative stress under moderate boron toxicity. *Plant growth regulation*, 70(3), 217-226. doi:10.1007/s10725-013-9793-853-59.
- Hamurcu, M., T. Demiral, EE Hakkı, Ö. Türkmen, S. Gezgin ve RW Bell. (2015). Bor toksisitesi ve kuraklıktan etkilenen karpuzda (*Citrullus lanatus*) oksidatif stres tepkileri. *Zemdirbyste-Tarım* 102 (2): 209 – 16. doi:10.13080/za.2015.102.027 .

- Hamurcu, M., Hakki, E. E., Sert, T. D., Özdemir, C., Minareci, E., Avsaroglu, Z. Z., Gezgin, S., Kayis, S. A. ve Bell, R. W., 2016a, Extremely high boron tolerance in *Puccinellia distans* (Jacq.) Parl. related to root boron exclusion and a well-regulated antioxidant system, *Zeitschrift für Naturforschung C*, 71 (7-8), 273-285.
- Hamurcu, M., Özdemir, C., Koçabaş, O., Hakki, E. E., Demiral, T., & Gezgin, S. (2016). Toksikite düzeyinde bor uygulamalarının besin çözeltisi koşullarında hibrit mısır çeşitlerinin anatomik özellikleri üzerine etkisi / Effect of boron toxicity on the anatomical features of hybrid maize varieties grown in nutrient solution culture]. *Journal of Boron*, 1(2),
- Hamurcu M., Hakki E. E., Khan M. K., Pandey A., Gezgin S., Çelik Ö., Samecullah M., Avşaroğlu Z.Z., Gümüş T., Çakır Ö. ve Ç, T., (2019), Model Bitki *Puccinella distans*'ta Bor – Tuz İnteraksiyonunun Serbest Radikaller Üzerine Etkileri, 8. *Ulusal Bitki Besleme ve Gübre Kongresi*.
- Hamurcu, M., Khan, M., Pandey, A., Avsaroglu, Z., Elbasan, F., Gezgin, S. (2020). Boron stress exposes differential antioxidant responses in maize cultivars (*Zea mays* L.). *J. Elem.* 25 (4), 1291–1304. doi: 10.5601/jelem.2020.25.3.1970
- Han, S., Chen, L.-S., Jiang, H.-X., Smith, B. R., Yang, L.-T., & Xie, C.-Y. (2008). Boron deficiency decreases growth and photosynthesis, and increases starch and hexoses in leaves of citrus seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 165(13), 1331-1341.
- Han, S., Tang, N., Jiang, H.-X., Yang, L.-T., Li, Y., & Chen, L.-S. (2009). CO₂ assimilation, photosystem II photochemistry, carbohydrate metabolism and antioxidant system of citrus leaves in response to boron stress. *Plant Science*, 176(1), 143-153.
- Harmankaya, M., Onder, M., Hamurcu, M., Ceyhan, E., & Gezgin, S. (2008). Response of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars to foliar and soil applied boron in boron-deficient calcareous soils. *African Journal of Biotechnology*, 7, 3275-3282.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfikar, F., Raza, A., Mohsin, S.M., Mahmud, J.A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants* (Basel, Switzerland), 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Hasanuzzaman, M., Raihan, M. R. H., Masud, A. A. C., Rahman, K., Nowroz, F., Rahman, M., . . . Fujita, M. (2021). Regulation of Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Salinity. *Int J Mol Sci*, 22(17). doi:10.3390/ijms22179326
- Hawrylak, B. ve Szymanska, M., 2004, Selebium as a sulphhydrylic group inductor in plants, *Cellular & Molecular Biology Letters*, 9, 329-336.
- Herzog, V. ve Fahimi, H., 1973, Determination of the activity of peroxidase, *Analytical Biochemistry*, 55, 554-562.
- Hossain, M. S., & Dietz, K.-J. (2016). Tuning of Redox Regulatory Mechanisms, Reactive Oxygen Species and Redox Homeostasis under Salinity Stress. *Frontiers in Plant Science*, 7. doi:10.3389/fpls.2016.00548
- Hrmova, M., Gilliam, M., & Tyerman, S. D. (2020). Plant transporters involved in combating boron toxicity: beyond 3D structures. *Biochemical Society Transactions*, 48(4), 1683-1696.
- Hu, D., Li, R., Dong, S., Zhang, J., Zhao, B., Ren, B., . . . Liu, P. (2022). Maize (*Zea mays* L.) responses to salt stress in terms of root anatomy, respiration and antioxidative enzyme activity. *BMC plant biology*, 22(1), 602. doi:10.1186/s12870-022-03972-4
- Huang, C., He, W., Guo, J., Chang, X., Su, P., & Zhang, L. (2005). Increased sensitivity to salt stress in an ascorbate-deficient *Arabidopsis* mutant. *Journal of Experimental Botany*, 56(422), 3041-3049.
- Huang, H., Ullah, F., Zhou, D.-X., Yi, M., & Zhao, Y. (2019). Mechanisms of ROS Regulation of Plant Development and Stress Responses. *Frontiers in Plant Science*, 10. doi:10.3389/fpls.2019.00800
- Hussain, S., Rasheed, M., Hamzah Saleem, M., Ahmed, Z., Hafeez, A., Jilani, G., . . . Ali, S. (2022). Salt Tolerance in Maize With Melatonin Priming to Achieve Sustainability in Yield in Salt Affected Soils. *Pakistan Journal of Botany*. doi:10.30848/PJB2023-1(27)
- Iqbal, N., Umar, S., & Khan, N. A. (2015). Nitrogen availability regulates proline and ethylene production and alleviates salinity stress in mustard (*Brassica juncea*). *Journal of Plant Physiology*, 178, 84-91.
- Iqbal, S., Hussain, S., Qayyum, M., Muhammad, A., & Ullah, S. (2020). The Response of Maize Physiology under Salinity Stress and Its Coping Strategies. In.
- Ishfaq, M., Wang, Y., Yan, M., Wang, Z., Wu, L., Li, C., & Li, X. (2022). Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. *Frontiers in Plant Science*, 13. doi:10.3389/fpls.2022.802274
- Ji, X., Tang, J., & Zhang, J. (2022). Effects of Salt Stress on the Morphology, Growth and Physiological Parameters of *Juglans microcarpa* L. Seedlings. *Plants*, 11(18), 2381. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/18/2381>

- Juan, N.-E., Lucia, Y.-M., Fuensanta, M.-B., Miriam, F.-P., & Micaela, C. (2024). Deciphering the effect of salinity and boron stress on broccoli plants reveals that membranes phytoosterols and PIP aquaporins facilitate stress adaptation. *Plant Science*, 338, 111923. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111923>
- Karabal, E., Yücel, M., & Öktem, H. A. (2003). Antioxidant responses of tolerant and sensitive barley cultivars to boron toxicity. *Plant Science*, 164(6), 925-933. doi:[https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00067-0)
- Karaoğlu, M., & Yalçın, A. M. (2018). Toprak Tuzluluğu ve Iğdır Ovası Örneği. *Journal of Agriculture*, 1(1), 27-41.
- Kayıhan, D. S., Kayıhan, C., & Çiftçi, Y. Ö. (2016). Excess boron responsive regulations of antioxidative mechanism at physio-biochemical and molecular levels in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, 337-345.
- Khan, A. A., Rao, S. A., & McNeilly, T. (2003). Assessment of salinity tolerance based upon seedling root growth response functions in maize (*Zea mays* L.). *Euphytica*, 131(1), 81-89. doi:10.1023/A:1023054706489
- Khan, M., Al-Mas'oudi, R., Al Said, F., & Khan, I. (2013). Salinity Effects on Growth, Electrolyte Leakage, Chlorophyll Content and Lipid Peroxidation in Cucumber (*Cucumis sativus* L.).
- Khan, M. I. R., & Khan, N. A. (2017). Reactive oxygen species and antioxidant systems in plants: role and regulation under abiotic stress: Springer.
- Khan, M. K., Pandey, A., Hamurcu, M., Avsaroglu, Z. Z., Ozbek, M., Omay, A. H., . . . Topal, A. (2021). Variability in physiological traits reveals boron toxicity tolerance in *Aegilops* species. *Frontiers in Plant Science*, 12, 736614.
- Kilinç, S., Karademir, C., & Ekin, Z. (2018). Bazı Mısır (*Zea mays* L.) Çeşitlerinde Verim ve Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 21, 809-816. doi:10.18016/ksutarimdog.vi.463813
- Kobayashi, M., Miyamoto, M., Matoh, T., Kitajima, S., Hanano, S., Sumerta, I. N., . . . Shibata, D. (2018). Mechanism underlying rapid responses to boron deprivation in *Arabidopsis* roots. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(1), 106-115. doi:10.1080/00380768.2017.1416670
- Kohli, S., Dhingra, H., Khanna, K., Handa, N., Bhardwaj, R., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2022). Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential. *Plant growth regulation*, 100. doi:10.1007/s10725-022-00844-7
- Kohli, S. K., Kaur, H., Khanna, K., Handa, N., Bhardwaj, R., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2023). Boron in plants: uptake, deficiency and biological potential. *Plant growth regulation*, 100(2), 267-282. doi:10.1007/s10725-022-00844-7
- Kohnhehshahri, S., & Demir, Y. (2021). Chitosan Against to Boron toxicity in maize. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 20, 3-13. doi:10.24326/asphc.2021.3.1
- Kthiri, Z., Hammami, M. D. E., Marzougui, O., Jabeur, M. B., Aouadi, A., Karmous, C., & Hamada, W. (2022). Salt Stress Effects on the Growth, Photosynthesis and Antioxidant Enzyme Activities in Maize (*Zea mays* L.) Cultivars. *Environmental Sciences Proceedings*, 16(1), 73. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2673-4931/16/1/73>
- Kumar, M., Kumar, R., Jain, V., & Jain, S. (2018). Differential behavior of the antioxidant system in response to salinity induced oxidative stress in salt-tolerant and salt-sensitive cultivars of *Brassica juncea* L. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 13, 12-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.11.003>
- Kumar, P., & Sharma, P. K. (2020). Soil salinity and food security in India. *Frontiers in sustainable food systems*, 4, 533781.
- Landi, M., Degl'Innocenti, E., Pardossi, A., & Guidi, L. (2012). Antioxidant and photosynthetic responses in plants under boron toxicity: a review. *Am. J. Agric. Biol. Sci*, 7(3), 255-270.
- Landi, M., Margaritopoulou, T., Papadakis, I. E., & Araniti, F. (2019). Boron toxicity in higher plants: an update. *Planta*, 250, 1011-1032.
- Lata, C., Kumar, A., Sharma, S., Singh, J., Sheokand, S., Pooja, . . . Rani, B. (2017). Tolerance to combined boron and salt stress in wheat varieties: Biochemical and molecular analyses.
- Li, M., Zhao, Z., Zhang, Z., Zhang, W., Zhou, J., Xu, F., & Liu, X. (2017). Effect of boron deficiency on anatomical structure and chemical composition of petioles and photosynthesis of leaves in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Scientific Reports*, 7(1), 4420.
- Litalien, A., & Zeeb, B. (2020). Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. *Science of The Total Environment*, 698, 134235. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134235>
- Liu, B., Soundararajan, P., & Manivannan, A. (2019). Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. *Plants*, 8(9), 307.

- Liu, L., Wang, X., & Chang, C. (2022). Toward a smart skin: Harnessing cuticle biosynthesis for crop adaptation to drought, salinity, temperature, and ultraviolet stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 961829.
- Madhava Rao, K. V. ve Sresty, T. V. S., 2000, Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses, *Plant Science*, 157, 113-128.
- Marschner, H. (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*: Academic press.
- Martinez-Ballesta, M. d. C., Bastías, E., Zhu, C., Schäffner, A. R., González-Moro, B., González-Murua, C., & Carvajal, M. (2008). Boric acid and salinity effects on maize roots. Response of aquaporins ZmPIP1 and ZmPIP2, and plasma membrane H⁺-ATPase, in relation to water and nutrient uptake. *Physiologia plantarum*, 132(4), 479-490. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2007.01045.x>
- Martinez, E. L., & Fernandez, F. J. B. (2019). Chapter 4 - Economics of Production, Marketing and Utilization. In S. O. Serna-Saldivar (Ed.), *Corn (Third Edition)* (pp. 87-107). Oxford: AACC International Press.
- Mishra, N., Jiang, C., Chen, L., Paul, A., Chatterjee, A., & Shen, G. (2023). Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14. doi:10.3389/fpls.2023.1110622
- Mishra, P., Bhoomika, K., & Dubey, R. S. (2013). Differential responses of antioxidative defense system to prolonged salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive Indica rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Protoplasma*, 250(1), 3-19. doi:10.1007/s00709-011-0365-3
- Mohamed, A. K., Qayyum, M., Shahzad, A., Gul, M., & Wakeel, A. (2015). Interactive Effect of Boron and Salinity on Growth, Physiological and Biochemical Attributes of Wheat (*Triticum aestivum*). *International Journal of Agriculture and Biology*, 18. doi:10.17957/IJAB/15.0032
- Muhammad, A. (2004). Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199(5), 361-376. doi:<https://doi.org/10.1078/0367-2530-00165>
- Munns, R. (2005). Genes and salt tolerance: Bringing them together. *The New phytologist*, 167, 645-663. doi:10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual review of plant biology*, 59, 651.
- Mushtaq, Z., Faizan, S., & Gulzar, B. Salt stress, its impacts on plants and the strategies plants are employing against it: A review. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 8(3), 81-91. doi:10.7324/JABB.2020.80315
- Naeem, M., Naeem, M. S., Ahmad, R., Ahmad, R., Ashraf, M. Y., Ihsan, M. Z., . . . Abdullah, M. (2018). Improving drought tolerance in maize by foliar application of boron: water status, antioxidative defense and photosynthetic capacity. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64(5), 626-639. doi:10.1080/03650340.2017.1370541
- Nakano, Y. ve Asada, K., 1981, Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts, *Plant and Cell Physiology*, 22(3), 867-880.
- Nejad, S. A. G., & Etesami, H. (2020). The importance of boron in plant nutrition. *Metalloids in plants: advances and future prospects*, 433-449.
- O'Neill, M. A., Ishii, T., Albersheim, P., & Darvill, A. G. (2004). Rhamnogalacturonan II: structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 55(1), 109-139.
- Ogunwole, A. A., Otusanya, O. O., Oloyede, F. A., & Olabamiji, T. M. (2015). Comparative Effects of Boron Toxicity and Deficiency on the Growth, Chlorophyll, Protein and some Cations Accumulation in Zea mays Seedlings. *International journal of innovation and scientific research*, 17, 316-335.
- Ort, D. R., & Long, S. P. (2014). Limits on Yields in the Corn Belt. *Science*, 344(6183), 484-485. doi:10.1126/science.1253884
- Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L.-S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5, 86.
- Ozfidan-Konakci, C., Yildiztugay, E., Alp, F. N., Kucukoduk, M., & Turkan, I. (2020). Naringenin induces tolerance to salt/osmotic stress through the regulation of nitrogen metabolism, cellular redox and ROS scavenging capacity in bean plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 157, 264-275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.10.032>
- Pandey, A., Khan, M. K., Hakki, E. E., Gezin, S., & Hamurcu, M. (2019). Combined Boron Toxicity and Salinity Stress—An Insight into Its Interaction in Plants. *Plants*, 8(10), 364. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2223-7747/8/10/364>
- Pereira, G. L., Siqueira, J. A., da Fonseca-Pereira, P., Omena-Garcia, R. P., Nascimento, V. L., Nunes-Nesi, A., & Araújo, W. L. (2022). Chapter 5 - From outside to inside: mechanisms modulating plant

- responses to boron stress. In T. Aftab, M. Landi, I. E. Papadakis, F. Araniti, & P. H. Brown (Eds.), *Boron in Plants and Agriculture* (pp. 91-126): Academic Press.
- Perveen, S., & Nazir, M. (2018). Proline treatment induces salt stress tolerance in maize (*Zea mays* L. Cv. Safaid Afgoi). *Pakistan Journal of Botany*, 50, 1265-1271.
- Pesireron, M., Senewe, R. E., Gaffar, A., & Yusuf. (2021). The characteristics of Tanimbar Island local maize in Maluku Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 648(1), 012048. doi:10.1088/1755-1315/648/1/012048
- Pingle, S. N., Suryawanshi, S. T., Pawar, K. R., & Harke, S. N. (2022a). The Effect of Salt Stress on Proline Content in Maize (*Zea mays*). *Environmental Sciences Proceedings*, 16(1), 64. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2673-4931/16/1/64>
- Prior, R. L. (2015). Oxygen radical absorbance capacity (ORAC): New horizons in relating dietary antioxidants/bioactives and health benefits. *Journal of Functional Foods*, 18, 797-810. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.12.018>
- Punia, H., Tokas, J., Malik, A., Bajguz, A., El-Sheikh, M., & Ahmad, P. (2021). Ascorbate–Glutathione Oxidant Scavengers, Metabolome Analysis and Adaptation Mechanisms of Ion Exclusion in Sorghum under Salt Stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 22, 13249. doi:10.3390/ijms22413249
- Qadir, M., Oster, J., Schubert, S., Noble, A., & Sahrawat, K. (2007). Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in agronomy*, 96, 197-247.
- Rahman, M., Rahman, K., Sathi, K. S., Alam, M. M., Nahar, K., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Supplemental Selenium and Boron Mitigate Salt-Induced Oxidative Damages in Glycine max L. *Plants (Basel)*, 10(10). doi:10.3390/plants10102224
- Ran, X., Wang, X., Gao, X., Liang, H., Liu, B., & Huang, X. (2021). Effects of salt stress on the photosynthetic physiology and mineral ion absorption and distribution in white willow (*Salix alba* L.). *PloS one*, 16(11), e0260086. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260086>
- Rajput, V. D., Harish, Singh, R. K., Verma, K. K., Sharma, L., Quiroz-Figueroa, F. R., . . . Mandzhieva, S. (2021). Recent Developments in Enzymatic Antioxidant Defence Mechanism in Plants with Special Reference to Abiotic Stress. *Biology (Basel)*, 10(4). doi:10.3390/biology10040267
- Rawat, J., Pandey, N., & Saxena, J. (2022). Role of Potassium in Plant Photosynthesis, Transport, Growth and Yield. In N. Iqbal & S. Umar (Eds.), *Role of Potassium in Abiotic Stress* (pp. 1-14). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*, 10(2), 277.
- Samet, H., & Çikili, Y. (2019). Response of Purslane (*Portulaca oleracea* L.) to Excess Boron and Salinity: Physiological Approach. *Russian Journal of Plant Physiology*, 66(2), 316-325.
- Sezer S. Effect of boron fertilizer applications on the growth and B, N uptake of maize (*Zea mays* L.) under the different soils. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2014;12 (2):1323-1327
- Schafer, F. Q., & Buettner, G. R. (2001). Redox environment of the cell as viewed through the redox state of the glutathione disulfide/glutathione couple. *Free radical biology and medicine*, 30(11), 1191-1212.
- Shaaban, M. (2010). Role of Boron in Plant Nutrition and Human Health. *American Journal of Plant Physiology*, 5. doi:10.3923/ajpp.2010.224.240
- Shahzad, A., M. Ahmad, M. Iqbal, I. Ahmed and G.M. Ali. 2012. Evaluation of wheat landrace genotypes for salinity tolerance at vegetative stage by using morphological and molecular markers. *Genet. Mol. Res.* 11 (1): 679-692.
- Shelp, B. J., Marentes, E., Kitheka, A. M., & Vivekanandan, P. (1995). Boron mobility in plants. *Physiologia Plantarum*, 94(2), 356-361.
- Sheidaei, S., Zahedi, M., & Meibodo, S. (2011). Effect of salinity stress on dry matter accumulation and ion distribution pattern in five safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 41(4), 811-819.
- Shireen F, Nawaz MA, Chen C, Zhang Q, Zheng Z, Sohail H, Sun J, Cao H, Huang Y, Bie Z. Boron: Functions and Approaches to Enhance Its Availability in Plants for Sustainable Agriculture. *Int J Mol Sci*. 2018 Jun 24;19(7):1856. doi: 10.3390/ijms19071856. PMID: 29937514; PMCID: PMC6073895.
- Tavallali, V., Karimi, S., & Espargham, O. (2018). Boron enhances antioxidative defense in the leaves of salt-affected *Pistacia vera* seedlings. *The Horticulture Journal*, 87(1), 55-62.
- Torgut, G., & Akbulut, G. (2019). Biochemical Investigation of Effects of Copolymers on Corn Plants Under Salt Stress. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10, 448-455. doi:10.21597/jist.645350

- Turan, M. A., Taban, S., Kayin, G. B., & Taban, N. (2018). Effect of boron application on calcium and boron concentrations in cell wall of durum (*Triticum durum*) and bread (*Triticum aestivum*) wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 41(11), 1351-1357.
- Tripathy, B. C., & Oelmüller, R. (2012). Reactive oxygen species generation and signaling in plants. *Plant Signal Behav*, 7(12), 1621-1633. doi:10.4161/psb.22455
- van Zelm, E., Zhang, Y., & Testerink, C. (2020). Salt Tolerance Mechanisms of Plants. *Annu Rev Plant Biol*, 71, 403-433. doi:10.1146/annurev-arplant-050718-100005
- Vennam, R. R., Bheemanahalli, R., Reddy, K. R., Dhillon, J., Zhang, X., & Adeli, A. (2024). Early-season maize responses to salt stress: Morpho-physiological, leaf reflectance, and mineral composition. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100994. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100994>
- Vera-Maldonado, P., Aquea, F., Reyes-Díaz, M., Cárcamo-Fincheira, P., Soto-Cerda, B., Nunes-Nesi, A., & Inostroza-Blancheteau, C. (2024). Role of boron and its interaction with other elements in plants. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1332459.
- Wang, M., Wang, Y., Zhang, Y., Li, C., Gong, S., Yan, S., . . . Yang, K. (2019). Comparative transcriptome analysis of salt-sensitive and salt-tolerant maize reveals potential mechanisms to enhance salt resistance. *Genes & Genomics*, 41(7), 781-801. doi:10.1007/s13258-019-00793-y
- Wang, Y., Jia, D., Guo, J., Zhang, X., Guo, C., & Yang, Z. (2017). Antioxidant metabolism variation associated with salt tolerance of six maize (*Zea mays* L.) cultivars. *Acta Ecologica Sinica*, 37(6), 368-372. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2017.08.007>
- Wang M, Gong S, Fu L, Hu G, Li G, Hu S, Yang J. The Involvement of Antioxidant Enzyme System, Nitrogen Metabolism and Osmoregulatory Substances in Alleviating Salt Stress in Inbred Maize Lines and Hormone Regulation Mechanisms. *Plants*. 2022; 11(12):1547. <https://doi.org/10.3390/plants11121547>
- Wimmer, M. A., & Eichert, T. (2013). Mechanisms for boron deficiency-mediated changes in plant water relations. *Plant Science*, 203, 25-32.
- Xiaozhou, L., Pei, S., Yanan, Z., Chao, J., & Chunfeng, G. (2020). A novel PGPR strain *Kocuria rhizophila* Y1 enhances salt stress tolerance in maize by regulating phytohormone levels, nutrient acquisition, redox potential, ion homeostasis, photosynthetic capacity and stress-responsive genes expression. *Environmental and experimental botany*, 174, 104023. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104023>
- Qu C, Liu C, Gong X, Li C, Hong M, Wang L, Hong F (2012) Impairment of maize seedling photosynthesis caused by a combination of potassium deficiency and salt stress. *Environ Exp Bot* 75:134–141. doi:[10.1016/j.envexpbot.2011.08.019](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.08.019)
- Yan, G., Fan, X., Peng, M., Yin, C., Xiao, Z., & Liang, Y. (2020). Silicon improves rice salinity resistance by alleviating ionic toxicity and osmotic constraint in an organ-specific pattern. *Frontiers in Plant Science*, 11, 260.
- Yassin, M., El Sabagh, A., Islam, M. S., Hossain, A., barutçular, C., Alharby, S., . . . Saneoka, H. (2019). Comparative performance of two bread wheat (*Triticum Aestivum* L.) genotypes under salinity stress. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17, 5029-5041. doi:10.15666/aeer/1702_50295041
- Yetişsin, F., & Karakaya, A. (2022). Tuz Stresi Altındaki Mısır Bitkisine Aseton O-(4 klorofenilsülfonil) Oksim (AO) Ön Uygulaması Stresin Olumsuz Etkilerini Hafifletir. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*.
- Yoshinari A, Takano J (2017) Insights into the mechanisms underlying boron homeostasis in plants. *Front Plant Sci* 8:1951
- Zhao, S., Zhang, Q., Liu, M., Zhou, H., Ma, C., & Wang, P. (2021). Regulation of Plant Responses to Salt Stress. *Int J Mol Sci*, 22(9). doi:10.3390/ijms22094609
- Zhou, H., Shi, H., Yang, Y., Feng, X., Chen, X., Xiao, F., Guo, Y. (2024). Insights into plant salt stress signaling and tolerance. *Journal of Genetics and Genomics*, 51(1), 16-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jgg.2023.08.007>