

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ARPA (*Hordeum vulgare* L.) ÇEŞİTLERİNDE  
ALÜMİNYUM TOKSİSİTESİ ETKİLERİNİN FİZYOLOJİK VE  
BİYOKİMYASAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve YILMAZ KAÇAR

Biyoloji Anabilim Dalı

TEMMUZ 2024



T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ARPA (*Hordeum vulgare* L.) ÇEŞİTLERİNDE  
ALÜMİNYUM TOKSİSİTESİ ETKİLERİNİN FİZYOLOJİK VE  
BİYOKİMYASAL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve YILMAZ KAÇAR

Biyoloji Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr.Üyesi Ali DOĞRU

TEMMUZ 2024



Merve YILMAZ KAÇAR tarafından hazırlanan “Farklı Arpa (*Hordeum vulgare* L.) Çeşitlerinde Alüminyum Toksikitesi Etkilerinin Fizyolojik ve Biyokimyasal Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 19.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :** **Prof. Dr. Hüseyin AKSOY** .....

Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr. Öğr. Üyesi Ali Doğru (Danışman)** .....

Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Doç. Dr. Mustafa YILMAZ** .....

Sakarya Üniversitesi



## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Farklı Arpa (*Hordeum vulgare* L.) Çeşitlerinde Alüminyum Toksikitesi Etkilerinin Fizyolojik ve Biyokimyasal Olarak İncelenmesi” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

(imza)

Merve YILMAZ KAÇAR





*Babama...*



## TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren, güler yüzlüğü ve hoşgörüsüyle desteğini esirgemeyen değerli danıőmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali DOĞRU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Arpa genotiplerine ait tohumların tedarik edildiği Ankara Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Çalışmamın laboratuvar aşamasında yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Dr. Sezen TOKSOY KÖSEOĞLU'na,

Tez sürecimde destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaőım Arő. Gör. Furkan Halit YOLCU' ya,

Tezimin düzenlenme aşamasında yardımlarını esirgemeyen ve vermiş olduğu manevi destekle beni her zaman cesaretlendiren değerli yüksek lisans dönem arkadaőım Tuğba ÖZDEMİR'e,

Hayatım boyunca her işin üstesinden gelebileceğimi ve başarabileceğimi hissettiren babam Cafer YILMAZ' a,

Sevgisi en güzel dayanağım olan annem Melek YILMAZ'a,

Bu süreci tamamlamamda emeği büyük olan ve her ihtiyacımda yanımda olan değerli eőim Serdar KAÇAR'a,

Varlığı en güzel gücüm olan biricik kızım Aybüke KAÇAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Merve YILMAZ KAÇAR



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	v
TEŞEKKÜR .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SİMGELER .....	xv
TABLO LİSTESİ .....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ .....	xix
ÖZET .....	xxi
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI .....</b>	<b>7</b>
2.1. Bitkilerde Büyüme ve Gelişme .....	7
2.2. Bitkide Stres .....	7
2.2.1. Bitkide strese karşı oluşturulan cevaplar .....	8
2.3. Bitki Beslemesinde Kullanılan Makro ve Mikro Elementler .....	11
2.4. Alüminyum .....	14
2.4.1. Alüminyumun bitkiler üzerine etkileri .....	15
2.4.2. Alüminyum toksisitesine karşı geliştirilen cevaplar .....	19
2.5. Bitkilerde Oksidatif Stres .....	21
2.6. Bitkide Antioksidant Sistem .....	23
2.6.1. Enzimatik antioksidantlar .....	23
2.6.2. Enzimatik olmayan antioksidantlar .....	26
2.7. Klorofil a Floresansı .....	28
2.8. Arpa ( <i>Hordeum vulgare</i> L.) Hakkında Genel Bilgiler .....	30
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>35</b>
3.1. Bitki Materyali .....	35
3.2. Bitkinin Büyüme Koşulları ve Deneysel Plan .....	35
3.3. Bazı Çimlenme ve Fizyolojik Büyüme Parametrelerinin Belirlenmesi .....	36
3.4. Oransal Su Miktarı .....	36
3.5. Membran Stabilite İndeksi .....	37
3.6. Antosiyanın Miktarı .....	37
3.7. Fotosentetik pigment miktarı .....	37
3.8. Dehidrogenaz Aktivitesi (TTC testi; 2, 3, 5-trifenil tetrazolyum klorür testi) .....	37
3.9. Evan's Blue Testi .....	38
3.10. Klorofil a Floresansı Ölçümleri .....	38
3.11. İstatistiksel Analizler .....	38
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>41</b>
4.1. Alüminyum Uygulamasının Kök Boyu, Gövde Boyu ve Toplam Boy Üzerine Etkisi .....	41
4.2. Alüminyum Uygulamasının Kök ve Gövdenin Taze ve Kuru Ağırlığı Üzerine Etkisi .....	41

4.3. Alüminyum Uygulamasının Yaprak Dokularındaki Oransal Su Miktarı ve Membran Stabilite İndeksi Üzerine Etkisi .....	43
4.4. Alüminyum Uygulamasının Köklerdeki Formazon Miktarı ve Evan's Mavisi Alınımı Üzerine Etkisi.....	44
4.5. Alüminyum Uygulamasının Yapraklardaki Antosiyanin Miktarı Üzerine Etkisi .....	45
4.6. Alüminyum Uygulamasının Yapraklardaki Fotosentetik Pigment Miktarı Üzerine Etkisi .....	46
4.7. Alüminyum Uygulamasının Yapraklardaki Fotosentetik Aktivite Üzerine Etkisi .....	47
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>55</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>61</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>79</b>



## **KISALTMALAR**

<b>AOT</b>	: Aktif oksijen türleri
<b>APOD</b>	: Askorbat peroksidaz
<b>ATP</b>	: Adenozin tri fosfat
<b>DNA</b>	: Deoksiribonükleik asit
<b>DHAR</b>	: Dehidroaskorbat redüktaz
<b>FS I</b>	: Fotosistem I
<b>FS II</b>	: Fotosistem II
<b>GPOD</b>	: Guaiakol peroksidaz
<b>GPOX</b>	: Glutasyon peroksidaz
<b>GR</b>	: Glutasyon redüktaz
<b>KAT</b>	: Katalaz enzimi
<b>MDHAR</b>	: Monodehidroaskorbat redüktaz
<b>NADPH</b>	: Üzüm çekirdeği ekstraktı
<b>NADP<sup>+</sup></b>	: Nikotinamid adenin dinükleotid fosfat
<b>SOD</b>	: Süperoksit dismutaz
<b>RNA</b>	: Ribonükleik asit
<b>UV</b>	: Ultraviyole ışınları



## SİMGELER

<b>°C</b>	: Santigrat derece
<b><sup>1</sup>O<sub>2</sub></b>	: Singlet oksijen
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>As</b>	: Arsenik
<b>B</b>	: Bor
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>C</b>	: Karbon
<b>Ca</b>	: Kalsiyum
<b>Cd</b>	: Kurşun
<b>Cl</b>	: Klor
<b>Cr</b>	: Krom
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>Co</b>	: Kobalt
<b>Fe</b>	: Demir
<b>gr</b>	: Gram
<b>H</b>	: Hidrojen
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	: Hidrojen peroksit
<b>Hg</b>	: Civa
<b>K</b>	: Potasyum
<b>kg</b>	: Kilogram
<b>lt</b>	: Litre
<b>μ</b>	: Mikro
<b>mg</b>	: Mikrogram
<b>Mg</b>	: Magnezyum
<b>Mm</b>	: Milimolar
<b>Mn</b>	: Mangan
<b>Mo</b>	: Molibden
<b>N</b>	: Azot
<b>Na</b>	: Sodyum
<b>Nm</b>	: Nanometre

<b>Ni</b>	: Nikel
<b><math>\mu</math>s</b>	: Mikrosaniye
<b>O</b>	: Oksijen
<b>O<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	: Süperoksit radikali
<b>OH<sup>-</sup></b>	: Hidroksil radikali
<b>P</b>	: Fosfor
<b>Pb</b>	: Kurşun
<b>Ppm</b>	: Milyonda bir
<b>rpm</b>	: Revolution per minute (dakikadaki devir sayısı)
<b>Q<sub>A</sub></b>	: Kinon A
<b>Q<sub>B</sub></b>	: Kinon B
<b>S</b>	: Kükürt
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>V</b>	: Vanadyum
<b>Zn</b>	: Çinko

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1.</b> <i>Hordeum vulgare</i> L. (arpa)'nın sistematığı (Şekilde kullanılan görsel Thome (1885) tarafından hazırlanmıştır.).....	31
<b>Tablo 2.2.</b> Dünya arpa ekim alanı, üretim ve verim ( <sup>1</sup> /Tahmin, <sup>2</sup> /Öngörü) (USDA, 2023). .....	32
<b>Tablo 2.3.</b> Türkiye arpa ekim alanı, üretim ve verim (TÜİK, 2023).....	32
<b>Tablo 3.1.</b> Hoagland besin çözeltisinin içeriği (Hoagland, 1920).....	36
<b>Tablo 3.2.</b> Klorofil a floresansı ölçümlerine bağlı olarak ölçülen ve hesaplanan JIP testi parametreleri (Doğru, 2019).....	39



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

- Şekil 2.1.** Bitki gelişimine etki eden stres faktörleri ve aralarındaki etkileşim (Doğru, 2006). ..... 9
- Şekil 2.2.** Bitkilerde çeşitli stres faktörlerine karşı oluşturulan stres cevapları (Doğru, 2006). . ..... 9
- Şekil 2.3.** Dünya topraklarındaki pH dağılımı (IGBP-DIS, 1998). ..... 16
- Şekil 2.4.** Alüminyum toksisitesi sonucu zarar görmüş kök (A) ve kök ucu (B) ile sağlıklı kök (C) ve kök ucu (D) (Delhaize ve Ryan., 1995). ..... 17
- Şekil 2.5.** Atmosferik oksijenden farklı AOT'lerin oluşması (Mittler, 2017). ..... 22
- Şekil 2.6.** Askorbat-glutasyon döngüsü (Hasanuzzaman ve ark., 2020a). ..... 25
- Şekil 2.7.** Modüle edilmiş florometrede floresans sinyalleri (MI, modüle ışık; SI, sature ışık; AI, aktinik ışık; KÖI, kızıl ötesi ışık) (Maxwell ve Johnson (2000)'den değiştirilerek alınmıştır) (Doğru, 2006). . ..... 30
- Şekil 4.1.** Alüminyum ( $Al_2O_{12}S_3.18H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinde (a) kök boyu, (b) gövde boyu ve (c) toplam boy üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler beş tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. ..... 42
- Şekil 4.2.** Alüminyum ( $Al_2O_{12}S_3.18H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinde (a) kök taze ağırlığı, (b) kök kuru ağırlığı, (c) gövde taze ağırlığı ve (d) gövde kuru ağırlığı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler beş tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. ..... 43
- Şekil 4.3.** Alüminyum ( $Al_2O_{12}S_3.18H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinde (a) oransal su miktarı ve (b) membran stabilite indeksi üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler üç tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. . ..... 44
- Şekil 4.4.** Alüminyum ( $Al_2O_{12}S_3.18H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin köklerinde (a) formazon miktarı ve (b) Evan's mavisi alınımları üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler üç tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. . ..... 45
- Şekil 4.5.** Alüminyum ( $Al_2O_{12}S_3.18H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki antosiyanin miktarı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler üç tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. ..... 46
- Şekil 4.6.** Alüminyum ( $Al_2O_{12}S_3.18H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki (a) klorofil a, (b) klorofil b, (c) toplam

- klorofil ve (d) toplam karotenoid miktarı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler üç tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. ..... 47
- Şekil 4.7.** Alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki (a) Fo, (b) Fm, (c) Fv/Fm, (d) alan, (e) Fv/Fo ve (f)  $\Delta V/\Delta t$  miktarı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler on tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. ..... 48
- Şekil 4.8.** Alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki (a)  $\phi\text{Po}$ , (b)  $\Psi\text{o}$ , (c)  $\phi\text{Eo}$ , (d)  $\phi\text{Do}$ , (e) ABS/RC ve (f) TRo/RC üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler on tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. ..... 49
- Şekil 4.9.** Alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki (a) ETo/RC, (b) DIo/RC, (c) SFI(abs), (d)  $\phi\text{o}/(1-\phi\text{o})$ , (e)  $\Psi\text{o}/(1-\Psi\text{o})$  ve (f) PI(abs) üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler on tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]. ..... 51
- Şekil 4.10.** Alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ , 3 mM) uygulanan iki farklı arpa genotipinde bazı JIP testi parametrelerinin (a) spesifik membran modeli ve (b) fenomenolojik verim modeline göre gösterimi. Fenomenolojik verim modelindeki (b) boş daireler sağlam reaksiyon merkezlerini, koyu renkli daireler ise hasar görmüş reaksiyon merkezlerini göstermektedir. .... 52
- Şekil 4.11.** Alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ , 3 mM) uygulanan iki farklı arpa genotipinde klorofil a floresansı indüksiyon (OJIP) eğrisi [(Farklı harfler kontrollere göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler on tekrarın ortalamasıdır)]. ..... 53

# FARKLI ARPA (*Hordeum vulgare* L.) ÇEŞİTLERİNDE ALÜMİNYUM TOKSİSİTESİ ETKİLERİNİN FİZYOLOJİK VE BİYOKİMYASAL OLARAK İNCELENMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada farklı arpa (*Hordeum vulgare* L.) genotiplerinde (Çetin-2000 ve Zeynelağa) alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ; 3 mM) toksisitesinin etkileri erken fide evresinde fizyolojik, biyokimyasal ve fotokimyasal olarak araştırılmıştır.

Al toksisitesi iki arpa genotipinde de kök ve gövde büyümesini yavaşlatmış ancak büyüme hızı üzerindeki inhibisyon etkisinin köklerde daha belirgin olduğu görülmüştür. Taze ağırlık bakımından gövdelerin Al toksisitesine daha duyarlı olduğu, kuru ağırlık bakımından ise Al toksisitesinin kök üzerinde daha etkili olduğu gözlenmiştir. Al toksisitesi Çetin-2000 genotipinin yapraklarındaki oransal su miktarını azaltmış, Zeynelağa genotipinde ise değiştirmemiştir. Bu sonuç Al toksisitesinin Çetin-2000 genotipinde su ilişkilerini bozduğunu göstermektedir. Her iki arpa genotipinin yapraklarındaki membran stabilite indeksi Al toksisitesinden etkilenmemiştir. Al toksisitesi altındaki köklerde formazon miktarı ve Evan's mavisinin alınımında meydana gelen değişimler Çetin-2000 genotipinde kök metabolizmasının Al toksisitesine daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Al stresi altındaki Çetin-2000 genotipinin yapraklarındaki antosiyanin miktarı kontrolle karşılaştırıldığında önemli derecede artmıştır. Ancak Zeynelağa genotipinde belirgin derecede azalmıştır. Bu da Zeynelağa genotipinde Al toksisitesine karşı savunma mekanizmasının bozulduğunu gösteriyor olabilir. Çetin-2000 genotipinin yapraklarındaki fotosentetik pigment (klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve toplam karotenoid) miktarı Al toksisitesi sonucu kontrolle karşılaştırıldığında önemli derecede azalmıştır. Bu sonuç Al toksisitesi altındaki Çetin-2000 genotipinde fotosentetik pigmentlerin parçalanma hızının artmasından ve/veya sentez hızının azalmasından kaynaklanıyor olabilir. Al toksisitesi altındaki Zeynelağa genotipinde ise fotosentetik pigment miktarı değişmemiştir. Klorofil a floresansı ölçümleri ve JIP testi parametrelerindeki değişimler Al toksisitesi sonucu her iki genotipte de fotosentetik elektron taşınım reaksiyonlarının olumsuz yönde etkilendiğini göstermiştir. Bunun dışında Al toksisitesinin her iki arpa genotipinde de fotosistem II birimlerini yapısal ve fonksiyonel anlamda etkilediği söylenebilir. Ancak diğer analiz sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, Çetin-2000 genotipinde fotosentetik aktivitedeki değişimler, bu genotipin Al toksisitesine uyum sağlayabildiğini göstermiştir. Zeynelağa genotipi ise Al toksisitesinden fotokimyasal olarak zarar görmüştür.

Sonuç olarak, Çetin-2000 genotipinin Al toksisitesine daha toleranslı olduğu ve Al toksisitesine uyum göstermesini sağlayan daha elastik bir mekanizmaya sahip olduğu söylenebilir. Ancak Zeynelağa genotipi Al toksisitesinden metabolik olarak zarar görmüştür.

Anahtar kelimeler: Al toksisitesi, arpa, klorofil a floresansı, JIP testi, fotosentetik aktivite



# PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ALUMINIUM TOXICITY IN DIFFERENT BARLEY (*Hordeum vulgare* L.) GENOTYPES

## SUMMARY

In this study, the physiological, biochemical and photochemical effects of aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; 3 mM) toxicity in some barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes (Çetin-2000 and Zeynelağa) has been investigated at the early seedling stage.

Seeds that are used in this study were obtained from the Republic of Türkiye Ministry of Agriculture and Forestry Field Crops Central Research Institute, Ankara, Türkiye. After sterilized in 5% sodium hypochlorite for 10 minutes, barley seeds were imbibed in bidistilled water for 4 hours, placed between wet filter papers in plastic bags and allowed to germinate in climate chamber at 25 °C in a dark environment for 3 days. Three days of uniform seedlings were transferred to the plastic pots containing perlite and Hoagland's nutrient solution and kept in a climate room under 18/25 °C temperature (night/day), 16/8 hours photoperiod (day/night), 50±5% relative humidity and 200  $\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$  light intensity for 10 days. Plants were exposed to aluminium toxicity (3 mM,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) for 5 days, while control plants were watered with Hoagland's nutrient solution until at the end of the experiment. After measuring chlorophyll a fluorescence in the intact leaves, plants were harvested.

The root and shoot length of barley plants were measured with a milimetric ruler. The fresh weight of roots and shoots were separately weighted and plant materials were kept in an oven at 70 °C for 3 days until the constant weight was reached. After that the dry weight of root and shoot of barley plants were determined. The leaf samples were immediately used to determine relative water content, membrane stability index, anthocyanin, and photosynthetic pigment content. Dehydrogenase activity was measured and Evan's blue test was done in the root samples. Experiments were a randomized complete block design with different independent replicates. Analysis of variance (ANOVA) was performed using SPSS 20.0 statistical software for Windows. To separate significant differences between means, Duncan test was used at  $P = 0.05$ .

Al toxicity decreased root growth in both barley genotypes, probably due to direct contact of roots with Al-rich nutrient solution. But the rate of growth inhibition in roots of the genotype Çetin-2000 was found to be more remarkable. The sensitivity of the root and shoot growth to Al toxicity in the genotype Çetin-2000 was almost the same, while shoot growth in the genotype Zeynelağa was less inhibited by Al toxicity compared to the genotype Çetin-2000. These results may show that transport of Al ions from roots to shoots in the genotype Zeynelağa was restricted by some metabolic mechanisms and/or physical barriers. Root fresh weight in the genotype Çetin-2000 was not significantly affected by Al toxicity, while it was remarkably decreased in the genotype Zeynelağa as a result of excess Al application. Biomass accumulation in roots of both barley genotypes, however, was dramatically declined by Al toxicity as indicated by the lowered dry weight. Al application caused significant decreases in

shoot fresh weight of both barley genotypes. Shoot dry weight in the genotype Zeynelağa, on the other hand, was not significantly affected by Al toxicity while it was remarkably diminished in the genotype Çetin-2000. These results clearly show that inhibitory effect of Al application on biosynthetic capacity in roots of both barley genotypes was more remarkable compared to shoots. Relative water content in the leaves of the genotype Çetin-2000 was significantly reduced by Al toxicity, which shows that Al toxicity interfered with water relations in this genotype. However, it was not affected by Al application in the genotype Zeynelağa. Al toxicity did not lead to membrane damage in the leaves of both barley genotypes as shown by the constant membrane stability index compared to corresponding controls. Formazon content in the roots of both barley genotypes under Al toxicity was found to be drastically lower than respective controls. However, formazon content in the roots of the genotype Çetin-2000 was more severely decreased by Al toxicity, indicating the fact that reactions of the cellular respiration in roots of this genotype was inhibited to a greater extent compared to the genotype Zeynelağa. Evan's blue content in roots of the genotype Çetin-2000 was significantly lower than the respective control, while it was not significantly affected by Al application in the genotype Zeynelağa. Similarly, these results also showed that vitality of the root tissue was drastically disrupted in the genotype Çetin-2000 under Al toxicity. Anthocyanin content in the leaves of the genotype Çetin-2000 was significantly increased by Al toxicity whereas it was drastically lower than the respective control in the leaves of the genotype Zeynelağa. It is obvious that the genotype Çetin-2000 could represent higher capacity to resist Al toxicity through anthocyanin accumulation in leaf tissues. However, the decreased level of anthocyanin in the leaves of the genotype Zeynelağa may show that either this barley genotype is sensitive to Al toxicity or the Al concentration used in this study is too low to affect this genotype metabolically. Chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, and total carotenoid content in the leaves of the genotype Çetin-2000 under Al toxicity was remarkably diminished compared to the respective control, while these parameters remained unchanged in the leaves of the genotype Zeynelağa as a result of Al application. In the case of the genotype Çetin-2000, the decreased level of photosynthetic pigment content in leaves may be explained by the accelerated rate of destruction and/or the slowed down of synthesis of the photosynthetic pigments under Al toxicity. On the other hand, this may be a kind of strategy for the genotype Çetin-2000 to reduce photosynthetic pigment pool to provide an equilibrium between the absorbed and photochemically quenched light energy under the condition of Al toxicity.

Changes in the chlorophyll a fluorescence measurements and JIP test parameters showed that photosynthetic electron transport reactions were impaired in the genotypes Çetin-2000 and Zeynelağa as a result of Al toxicity.  $F_0$  (minimum fluorescence), for example, was significantly decreased in the leaves of the genotype Çetin-2000 under Al toxicity, while it was drastically increased by excess Al application in the genotype Zeynelağa. These results show that Al toxicity led to the decreased transport rate of the light energy from the pigment molecules to the reaction centres or conversion of the reaction centres from active to inactive form. Another possible explanation for the increased  $F_0$  value may be that Al toxicity inhibited the movement of electrons from quinone A to quinone B, and hence decreased the ability of the photosystem II units to trap light energy effectively.  $F_m$  (maximum fluorescence) in the leaves of the genotype Çetin-2000 was found to be significantly lower than the respective control, indicating that the stability of the acceptor side of the photosystem II units was diminished by Al toxicity.  $F_v/F_m$  (maximum quantum

efficiency of photosystem II), which must be around 0,83 under optimum conditions, was significantly lower than control in the genotype Zeynelağa under Al toxicity, while it remained unchanged in the genotype Çetin-2000, indicating that Al toxicity led to a remarkable photoinhibition in photosystem II activity in the genotype Zeynelağa. Also, the decreased  $\phi P_o$  value in the genotype Zeynelağa under Al toxicity as compared to the genotype Çetin-2000 showed that the primary photochemical reactions in the genotype Zeynelağa was inhibited to some extent. In this study, the parameters area,  $F_v/F_o$ , and  $\Delta V/\Delta t_o$  in both barley genotypes under Al toxicity did not represent significant changes compared to the respective controls. However, the lower level of area in the genotype Çetin-2000 under Al toxicity may indicate the decreased rate of electron transport which has a regulatory effect on photosystem II activity as compared to the genotype Zeynelağa devoiding of this mechanism. Compared to the genotype Çetin-2000, significantly lower and higher values of  $F_v/F_o$  and  $\Delta V/\Delta t_o$  in the genotype Zeynelağa respectively, showed that Al toxicity led to the inhibition of the efficiency of the Hill reaction and the accelerated rate of the accumulation of the closed reaction centres. Al toxicity significantly reduced  $\Psi_o$  in the genotype Çetin-2000 and did not affect in the genotype Zeynelağa compared to the respective controls, indicating the restricted ability of an absorbed photon to move electrons from quinone A to the electron transport system in the genotype Çetin-2000. In this study,  $\phi E_o$  and  $\phi D_o$  in the genotypes Çetin-2000 and Zeynelağa under Al stress were not drastically affected compared to the corresponding controls. However, Al application led to the significantly lower  $\phi E_o$  and higher  $\phi D_o$  in the genotype Zeynelağa, respectively, compared to the Al-stressed Çetin-2000. These results showed that quantum efficiency of the electron transport from quinone A to plastoquinone was diminished, while quantum efficiency of thermal energy dissipation was accelerated in the genotype Zeynelağa under Al toxicity. Changes in the parameters  $E_{T_o}/RC$  and  $D_{I_o}/RC$  in both barley genotypes under Al stress also confirmed this fact.  $T_{R_o}/RC$  in both barley genotypes was not significantly affected by Al toxicity compared to the respective controls. However, the genotype Zeynelağa represented remarkably higher  $T_{R_o}/RC$  value as a result of Al application compared to the genotype Çetin-2000. This result indicated that maximum energy flux per reaction centre leading to the reduction of quinone A was increased in the genotype Zeynelağa compared to the genotype Çetin-2000. In addition, it has been found that Al toxicity negatively affected the structure and function of the photosystem II units in the genotype Zeynelağa compared to the genotype Çetin-2000. Taken together, changes in the genotype Çetin-2000 in terms of the photosynthetic activity indicated that this genotype could acclimate to Al toxicity. The genotype Zeynelağa, on the other hand, suffered from Al toxicity photochemically.

As a result, it may be concluded that the genotype Çetin-2000 could be more tolerant to Al toxicity and have an elastic metabolism to acclimate Al toxicity. In contrast, the metabolism of the genotype Zeynelağa was impaired by Al toxicity.

Key words: Al toxicity, barley, chlorophyll a fluorescence, JIP test, photosynthetic activity



## 1. GİRİŞ

Bitkide büyüme, hücrelerin genişlemesi ve bölünmesinden kaynaklı; kuru madde miktarında, hacminde, uzunluğunda veya boyutunda geri dönüşümü olmayan bir artışı ifade eder (Lambers ve Oliveira, 2019). Gelişim ise bitkinin; çimlenme, büyüme, olgunlaşma, farklılaşma ve, senesens gibi hayatı boyunca geçirmiş olduğu tüm değişimlerdir. Doğadaki şartlar nadiren bitkinin büyüüp gelişebilmesi için ideal koşullar sunar. Bitkilerin yetiştiği ve geliştiği ortamlarda genellikle birden fazla faktör ya eksik ya da idealden oldukça uzaktır. Bitkiler eş zamanlı maruz kaldıkları bu olumsuz faktörler karşısında sınırlı rekabet kapasitesine sahiptir ve önemli derecede strese maruz kalır. Bu stres bazı biyokimyasal ve fizyolojik mekanizmaların devreye sokulmasıyla ortadan kaldırılmaya ya da aşılmaya çalışılır (Kadıoğlu, 2007). Ancak bitkilerin stres faktörleri karşısında verdikleri tepkiler; bitkinin türüne, adaptasyon, uyum ve stres dayanıklılık mekanizmaları geliştirme yeteneklerine göre değişim gösterir (Yavaş ve İlker, 2020). Ayrıca bitkinin maruz kaldığı stresin süresi ve şiddeti uzarsa, bitkisel doku ve organlarda hasarlar oluşabilir ve bu hasarlar bitkinin ölümüne neden olabilir.

Bitkide büyüme ve gelişim, genetik faktörler (Hrivnák ve ark., 2017; Housset ve ark., 2018) ile çevresel faktörlerin etkileşimi sonucu meydana gelir (Koç, 2022a; Li ve ark., 2020; Mu ve ark., 2022) ve bu süreçteki her aşamada bitki besin elementlerinin önemi büyüktür (Abdelaal ve ark., 2021; Bayraklı, 1987). Bitki gelişimi için besin elementlerinden nispeten daha fazla miktarlarda gereksinim duyulanlara makro; eser miktarlarda ihtiyaç duyulanlara ise mikro besin elementi denmektedir (Bayraklı, 1987). Ağır metallerin bir kısmı (Fe, Zn, Mn, Ni ve Cu gibi) mikro besin elementi olarak kullanılsa da; büyük bir kısmı bitki gelişimi için gerekli değildir (Al, As, Cd, Cr ve Pb gibi) ve bitkiler için toksik etki gösterir (Dubey ve ark., 2018; Morkunas ve ark., 2018; Rahman ve ark., 2018). Besin elementlerinin eşik değerlerde alınması önemlidir. İster makro ister mikro besin elementi olsun eksikliği ya da fazlalığı bitkinin içsel yapılarında ve dış görünümünde çeşitli olumsuzluklara yol açar (Ghori ve ark., 2019; Kadıoğlu, 2007; Kumar ve ark., 2021; Yaashikaa ve ark., 2022). Çevresel kirleticiler, aşırı gübreleme, toprak asitliği gibi faktörler; toprakta doğrudan

ya da dolaylı olarak ağır metal elementlerinin birikimini artırır ve bu birikimin oluşturduğu en önemli toksik etkilerden biri de besin elementlerinin su ile hücre içine yeterince alınamamasından kaynaklanan bitki büyüme ve gelişiminin kesintiye uğramasıdır (Koç ve ark., 2022; Mansoor ve ark., 2021).

Doğada bitki büyümesini ve gelişimini etkileyen birçok abiyotik ve biyotik stres faktörü vardır. Alüminyum toksisitesi, dünya çapında asitli topraklarda bitki büyümesini ve gelişimini etkileyen önemli bir abiyotik stres faktörüdür (Ma, 2000; Nunes-Nesi ve ark., 2014; Poschenrieder ve ark., 2008). Dünya üzerindeki, potansiyel ekilebilir alanların yaklaşık %67'sinin (Abate ve ark., 2013; Von Uexkull ve Mutert, 1995) tarımı yapılan alanların ise yaklaşık %30-50'sinin (Kochian ve ark., 2004) doğal olarak asidik özellik gösterdiği düşünüldüğünde, bitki verimindeki azalışların alüminyum toksisitesiyle yakından ilişkili olduğu söylenebilir.

Alüminyum dünyada en çok bulunan minerallerden biridir ve uygun koşullarda yer kabuğunun çözünmeyen bir bileşeni (alüminyum silikatlar veya oksitler) olarak herhangi bir toksik etkiye sahip değildir. Alüminyumun toksik etki oluşturması daha çok toprak pH'sına bağlı olarak dönüşmüş olduğu formu ilgilidir. Çeşitli faktörlerin etkisiyle pH değeri 4.5-5'in altına inen topraklarda (asitli toprak) alüminyum, en toksik hali olan  $Al^{+3}$  formuna ( $Al(H_2O)_6^{+3}$ ) dönüşür. Alüminyumun bu formu toprak suyu içinde çözünme özelliği gösterdiği için bitkilerin kökleri tarafından kolayca alınır ve bitkide çeşitli hasarların oluşmasına neden olur (Matsumoto, 2000; Matsumoto ve Motoda, 2013; Sade ve ark., 2016).

Alüminyum iyonları mikromolar (mM) seviyelerde dahi, kısa süre (30 dk) içerisinde bitki büyümesini ve fonksiyonlarını inhibe edebilir (Blarney ve ark., 2004). Bitkiler üzerinde yapılan çalışmalarda alüminyumun; kök morfolojisi ve gelişimini olumsuz etkilediği (Čiamporová, 2002; Vardar ve ark., 2006; Vardar ve ark., 2011); hücre çeperinin sertliğini artırdığını (Eekhout ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2014); hücre membranlarının elektriksel yük dağılımını değiştirerek depolarizasyona neden olduğu ve topraktan gerekli suyun ve besin elementlerinin alınımını engellediği (Bose ve ark., 2011; Hufnagel ve ark., 2018; Jones ve ark., 2006; Rahman ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2007); terleme (transpirasyon) oranını, fotosentez hızını ve stoma iletkenliğini azalttığı (Rahman ve ark., 2018), DNA replikasyonunu yavaşlatarak hücre bölünme hızını azalttığı (Eekhout ve ark., 2017) belirtilmiştir. Bununla birlikte alüminyum

toksitesinin diğerk bir önemli sonucudaAOT (aktif oksijen türlerini) miktarını artırarak bitkilerde oksidatif strese neden olmasıdır (Pan ve ark., 2001).

Bitkilerin Al toksitesine karşı vermiş oldukları morfolojik, fizyolojik ve biyokimyasal cevaplar bitkinin tolerans geliştirme yeteneğine göre değişmektedir. Al toksitesine karşı geliştirilmiş savunma stratejilerine; organik asit salınımının artması (Ryan ve ark., 2010; Vardar ve Ünal, 2007; Yang ve ark., 2007); şelatlama (Vardar ve Ünal, 2007), müsilaj kılıf oluşumu (Barceló ve Poschenrieder, 2002; Vardar ve Ünal, 2007), Al iyonlarının hücre çeperinde bağlandığı bileşiklerin azaltılması (Wang ve ark., 2015; Yang ve ark., 2008, 2011), Al iyonlarının vakuollerde ve apoplastik alanda birikimi (Barceló ve Poschenrieder, 2002; Ma ve ark., 2014) örnek olarak verilebilir. Bunun yanında Al toksitesine karşı geliştirilen diğerk bir önemli cevap ise; bitkilerin oksidatif stres savunma mekanizmalarını aktifleştirerek çeşitli antioksidant enzimlerin (APOD, SOD, CAT, GPOD gibi) aktivitesinin artışı sağlamaktır (Wang ve Yang, 2005; Zhang ve ark., 2010).

Aerobik canlı yaşamı için vazgeçilmez olan oksijen, aynı zamanda canlı için potansiyel bir oksidatif tehlikedir. Bunun sebebi serbest radikal olarak oksijenin, temel durumdayken ( $O_2$ ) eşlenmemiş iki elektronu sayesinde su dışındaki diğerk moleküllerle de kolayca indirgenebilmesi ve aktif oksijen türlerini oluşturabilmesidir (Dat ve ark., 2000). Atmosferik oksijen, enerji transferi ile çeşitli AOT'lerin oluşmasını sağlar. Singlet (tekli) oksijen ( $^1O_2$ ), süperoksit anyonu ( $O_2^-$ ), hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ve hidroksil radikali ( $OH^-$ ) hücre içinde sık görülen aktif oksijen türlerindedir (Gutteridge ve Halliwell, 1990). Bitkilerde serbest radikal olarak AOT'ler; membrana bağlı elektron iletim aktiviteleri dahil (Çakır, 2007), kloroplast, mitokondri ve peroksizom gibi organellerde birkaç metabolik yolla ara ürün olarak açığa çıkar (Van Breusegem ve Dat, 2006). Optimum şartlarda ara ürün olarak üretilen AOT'ler bazal seviyelerdedir ve hücrenin antioksidant savunma sistemi tarafından hızlıca detoksifiye edilerek hücreye zarar vermeleri engellenir. Fakat çeşitli abiyotik ve biyotik stres koşulları altında AOT'lerin üretilmesi ve AOT'lerin detoksifikasyonu arasındaki hız dengesi bozulur (Van Breusegem ve ark., 2001).

Hücrede belirli bir seviyenin üzerine çıkan AOT ise doğrudan ya da dolaylı olarak toksik etki göstererek bitkide oksidatif strese neden olur (Das ve Roychoudhury, 2014; Ishtiyak ve ark., 2018). Hücre membran lipitleri, proteinler, klorofil pigmentleri, enzimler, nükleik asitler gibi birçok biyomolekül zarar görür (Büyük ve ark., 2012;

Smirnoff, 1993). Özellikle lipid peroksidasyonu sonucunda oluşan MDA (malondialdehit), oksidatif stres düzeyinin temel belirteci olarak kabul edilir (Juknys ve ark., 2012; Verma ve Dubey, 2003). MDA, hücre membranındaki iyon geçirgenliğini ( $Ca^{+2}$ ,  $Na^{+}$ ) artırır, enzimatik değişikliklere ve membran bütünlüğünün bozulmasına yol açarak hücreye zarar verir (Montillet ve ark., 2005).

Bitkilerin oksidatif stres altında, AOT'leri kontrol altında tutmak ve AOT'lerin toksik etkilerinden korunmak için geliştirmiş oldukları savunma sistemine, antioksidant sistem denmektedir (Büyük ve ark., 2012; Elliott, 1999; Soydam Aydın ve ark., 2012). Antioksidant sistemde görev alan moleküller ise antioksidant olarak adlandırılmaktadır. Antioksidantlar enzimatik olan ve enzimatik olmayan olmak üzere iki grupta incelenir (Hasanuzzaman ve ark., 2020b; Mohammadi ve ark., 2021; Scandalios, 1997). Süperoksid dismutaz (SOD), katalaz (KAT), askorbat peroksidaz (APOD), guaiakol peroksidaz (GPOD), glutatyon peroksidaz (GPOX), glutatyon redüktaz (GR), dehidroaskorbat redüktaz (DHAR) ve monodehidroaskorbat redüktaz (MDHAR), enzimatik olan antioksidantlardır (Scandalios, 1997). Askorbik asit (vitamin C),  $\alpha$ -tokoferoller (vitamin E), karotenoidler, glutatyon ve fenolik bileşikler ise enzimatik olmayan antioksidantlardır (Gill ve Tuteja, 2010).

Süperoksid dismutaz (SOD), bitki hücrelerinde AOT'lere karşı ilk savunma hattını oluşturmaktadır. Süperoksit radikalinin ( $O_2^-$ ) hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ve moleküler oksijene ( $O_2$ ) dönüşmesini dismutasyon reaksiyonuyla katalizler (Karuppanapandian ve ark., 2011; Mehla ve ark., 2017). SOD ile süperoksit radikalinin detoksifiye edilmesi Haber-Weiss reaksiyonu yoluyla hidroksil iyonu radikalinin üretilme ihtimalini düşürür (Berwal ve Ram, 2018). Askorbat peroksidaz (APOD), SOD enziminin katalizlediği reaksiyon sonucu oluşan  $H_2O_2$ 'nin su ve oksijene kadar yıkılmasında görev alan askorbat-glutatyon döngüsünün ilk enzimidir (Asada, 1999). APOD, bu reaksiyonda indirgeyici molekül olarak askorbatı kullanır. Dehidroaskorbat redüktaz (DHAR) ve monodehidroaskorbat redüktaz (MDHAR) enzimleri ise askorbatın rejenerasyonunu sağlar (Bowler ve ark., 1992; Jiménez ve ark., 1998; Noctor ve Foyer, 1998). Glutatyon redüktaz (GR) ise, bu döngünün son enzimi olarak çalışır ve elektronunu vererek okside olmuş glutatyonu NADPH'nin yardımıyla indirgemekten sorumludur (Asada, 1999). Özetle APOD, GR, MDHAR ve DHAR  $H_2O_2$ 'nin detoksifikasyonunda görev alır.  $H_2O_2$ 'nin parçalanmasından sorumlu olan diğer bir enzim ise guaiakol peroksidazdır (GPOD). Bu enzim bitkilerde biyotik stres

faktörlerinde antioksidant olarak işlev görmekle birlikte indol-3-asetik asit adlı bitkisel hormonu parçalamada ve hücre çeperlerinde lignin biyosentezinde de etkilidir (Asada, 1999). Katalaz (KAT), hidrojen peroksidin su ve oksijene dönüşüm reaksiyonlarını katalizlemektedir (Sharma ve ark., 2012).

Askorbik asit, antioksidant savunma sisteminde enzimatik ve enzimatik olmayan birçok reaksiyonda ihtiyaç duyulan elektronları sağlayarak indirgeyici rolünü üstlenir. Süperoksit, hidrojen peroksit ve hidroksil gibi AOT'leri etkisiz hale getirerek hücreyi koruma altına alır (Smirnoff, 2000). Glutasyon; tekli uyarılmış oksijen ( $^1O_2$ ), hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ve hidroksil radikali ( $OH\cdot$ ) gibi AOT'lerin potansiyel temizleyicisi olmasının yanında (Briviba ve ark., 1997; Larson, 1988; Noctor ve Foyer, 1998) stres koşulları altında bazı genlerin ekspresyonunda ve askorbat-glutasyon döngüsünde görev almaktadır (Mullineaux ve Rausch, 2005; Rausch ve Wachter, 2005; Xiang ve ark., 2001).  $\alpha$ -tokoferol, AOT'lerin ve lipid radikallerinin detoksifikasyonunda rol oynayarak fosfolipitlerin peroksidasyonunu ve hücre membranlarının zarar görmesini engeller (Gey ve ark., 1991; Hollander-Czytko, 2005). Karotenoidler, singlet oksijen ve fotosentez sırasında açığa çıkan diğer AOT'leri detoksifiye eder ve lipid peroksidasyonunu yavaşlatarak fotosentetik aygıtı ışık etkisiyle oluşabilecek zararlardan korur (Collins, 2001). Bitki fenoliklerinin ise antioksidant olarak işlev görmeleri redoks özelliklerinden kaynaklanır. İndirgeyici ajan, hidrojen verici, singlet oksijen önleyici ve metal şelasyonu yapıcı olarak etki ederler (Packer ve ark., 1999; Summanen ve ark., 2001).

Sonuç olarak Al toksisitesi, asitli topraklarda ürün veriminin düşmesindeki en önemli nedenlerden biridir (Wild, 1988). Dünya genelinde tarımsal arazilerdeki asitlik düzeyinin yüksek olması özellikle arpa gibi tahılların üretiminde olumsuzluklara sebep olmaktadır (Silva ve ark., 2012). Yapılan çalışmalarda alüminyumun özellikle arpa, buğday, mısır ve çavdar gibi tarım bitkilerinde fotosentez hızını azalttığı belirtilmiştir (Dawood ve ark., 2012; Silva ve ark., 2012; Zhao ve ark., 2017). Günümüzde tarım arazilerine kireç, magnezyum veya kalsiyum eklenmesi gibi yaklaşımlarla asitli toprağın bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki olumsuz etkileri belirli oranlarda giderilmeye çalışılsa da (Pandey ve ark., 2013) bunlar hem ekonomik açıdan pahalı yöntemler olup hem de ekolojik olarak sürdürülebilir değildir. Bu nedenle asitli topraklarda ciddi bir sorun olan Al toksisitesine karşı toleranslı bitki genotiplerinin belirlenmesi, aynı zamanda toprak asiditesiyle baş etmenin en etkili yolu olacaktır.

Arpa dünya çapında ekimi yapılan tahıl bitkileri arasında dördüncü sıradadır. Arpanın Al toksisitesine karşı oldukça duyarlı bir tür olduğu bilinmekle beraber (Mugwira ve ark., 1976) arpa genotipleri içinde Al'ye tolerans geliştiren varyasyonların da olduğu tespit edilmiştir (Minella ve Sorrells, 1992; Reid ve ark., 1969). Alüminyumun yüksek konsantrasyonları arpa bitkisinde ölüme ya da ürün kaybına yol açmaktadır. Bu yüzden arpanın genetik varyasyonlarının Al toleransı bakımından incelenmesi, ıslah çalışmaları açısından da önemlidir (Read ve Oram, 1995).

Bu bilgiler ışığında çalışmada Çetin-2000 ve Zeynelağa adlı iki arpa (*Hordeum vulgare* L.) genotipinin Al toksisitesine (3 mM) karşı göstermiş olduğu değişimler; bazı fizyolojik büyüme parametreleri (kök boyu ve gövde boyu) ve fotosentetik aktivitede meydana gelen değişimler (bazı klorofil floresans parametreleri) yoluyla araştırılmış ve Al toleransı ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır.

## **2. LİTERATÜR TARAMASI**

### **2.1. Bitkilerde Büyüme ve Gelişme**

Canlıların ortak özelliklerinden biri olan büyüme, geri dönüşümü olmayan bir hacim artışını ifade eder. Bitki gibi çok hücreli organizmalar, hem hücre hacimlerini hem de hücre sayılarını artırarak büyür. Organizmada büyümenin gerçekleşebilmesi için hücredeki sentez hızının yıkım hızından daha fazla olması gerekir. Bu nedenle hücreler, metabolizma sırasında tükettiğinden daha fazla miktarda maddeyi çevresinden almaya ihtiyaç duyar (Kadioğlu, 2007).

Bitkiler yaşam döngüleri süresince sahip oldukları meristem dokuları sayesinde sınırsız büyüme özelliği gösteren canlılardır. Bu nedenle bitkide büyüme, bitkinin boyutunda ve kuru madde ağırlığında sürekli bir artış olarak tanımlanmaktadır. Bitkilerde büyüme, meristemlerin bulunduğu belirli özelleşmiş alanlarda meydana gelir ve meristemler bulunduğu bölgeye göre apikal ve yanal meristem olarak adlandırılır. Apikal meristemler sürgünlerin yanal tomurcuklarında, kök ve gövde uçlarında hücre sayısını artırarak boyuna büyümeyi sağlar ve bu süreç primer büyüme olarak ifade edilir. Otsu bitkilerde neredeyse bitkinin tamamı primer büyümeyle meydana gelir. Yanal meristemler ise odunsu bitkilerin kök ve gövdesinde yer alarak boyuna büyümenin durduğu kısımlarda enine büyümeyi sağlar ve bu süreç de sekonder büyüme olarak ifade edilir (Reece ve ark, 2013).

Büyüme sırasında çoğu hücre, gen ifadesinin düzenlemesiyle farklılaşır (Kadioğlu, 2007). Bitkide farklılaşma sırasında meristematik hücrenin fiziksel ve fonksiyonel özellikleri değişime uğrayarak farklı organ ve yapıları oluşturur. Bitkinin; çimlenme, büyüme, olgunlaşma, farklılaşma ve senesens gibi hayatı boyunca geçirmiş olduğu tüm değişimler ise gelişim olarak adlandırılır. Bitki organlarının gelişim stratejileri değişen koşullara karşı esnek olmalıdır (Kadioğlu, 2007).

### **2.2. Bitkide Stres**

Canlılar yaşamlarını sürdürdükleri alanlarda, zaman zaman gelişimlerini kısıtlayan bazı faktörlere maruz kalırlar. Bitkide büyüme, gelişme ve metabolizmaya olumsuz

etki eden veya engel olan bu faktörler stres olarak adlandırılmaktadır (Gürel ve Avcıoğlu, 2001). Stres faktörlerinin etkileri genellikle eş zamanlı ve kombine şeklinde kendini gösterir (Ekmekçi ve Terzioğlu, 2005). Stres faktörleri, orjinlerine bakımından abiyotik ve biyotik olarak iki grupta incelenmektedir. Abiyotik stres faktörleri kuraklık, tuzluluk, ağır metaller, aşırı sıcak-soğuk, aşırı sulama ve radyasyon gibi canlı olmayan fiziksel veya kimyasal faktörlerden oluşmaktadır. Biyotik stres faktörleri ise virüsler, bakteriler, mantarlar, nematodlar, böcekler, herbivorlar ve yabancı otlar gibi canlı organizmalardan oluşmaktadır (Gull ve ark., 2019). Şekil 2.1 bitki gelişimine etki eden stres faktörleri ve aralarındaki etkileşim gösterilmektedir.

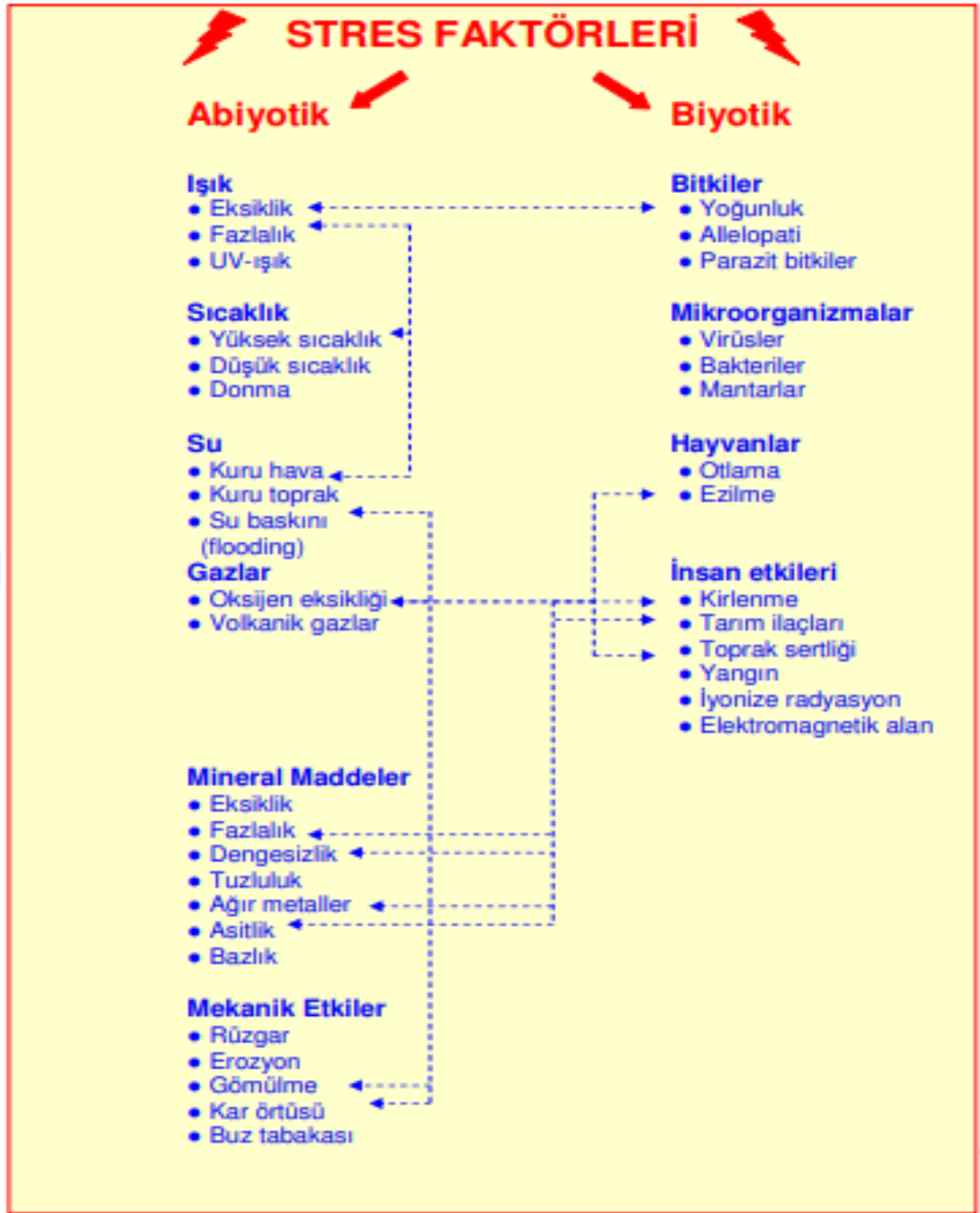
Doğadaki şartlar bitkiye nadiren ideal koşullar sunar. Bitkilerin yetiştiği ve geliştiği ortamlarda genellikle birden fazla faktör ya eksik ya da gerekenden oldukça fazladır. Bitkiler eş zamanlı maruz kaldıkları bu olumsuz faktörler karşısında sınırlı rekabet kapasitesine sahiptir ve önemli derecede strese maruz kalır.

Bitkiler bu stresi bazı biyokimyasal ve fizyolojik mekanizmaları işleyişe sokarak ortadan kaldırmaya ya da aşmaya çalışır (Kadioğlu,2007). Ancak stresin süresi ve şiddeti uzarsa, bitkide hasarlar oluşur ve bu hasarlar bitkinin ölümüne neden olabilir.

### **2.2.1. Bitkide strese karşı oluşturulan cevaplar**

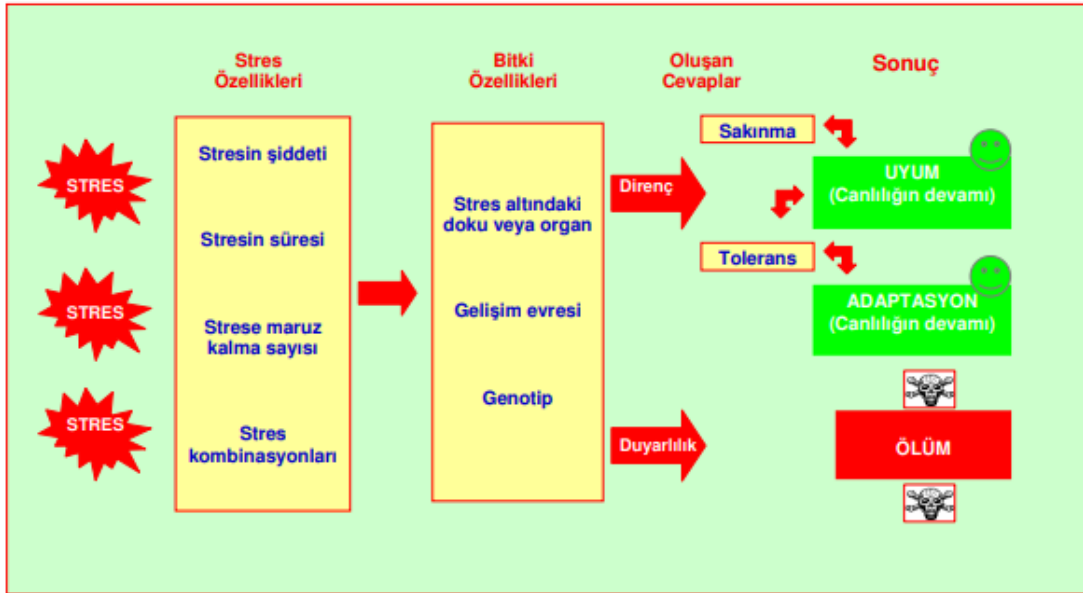
Bitkilerin stres faktörleri karşısında verdikleri tepki; bitkinin türüne, adaptasyon ve stres dayanıklılık mekanizmaları geliştirme yeteneğine göre değişir (Yavaş ve İlker, 2020). Farklı türler arasında olduğu gibi tek bir türün farklı çeşit ya da genotiplerinin de aynı strese verdikleri cevaplar birbirinden farklılık içerebilir (Bray ve ark., 2000; Doğru, 2006). Bu durum canlıların hayatta kalabilme şanslarını etkilemiş ve doğal seleksiyonun ortaya çıkmasında rol almıştır.

Stres dayanıklılığı ya da diğer ismiyle stres direnci organizmanın olumsuz koşullar içinde canlılığını devam ettirebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Bütün bitkiler, belirli bir değere kadar strese karşı koyma ve canlılığını koruyabilme potansiyeline sahiptir. Stres direnci ya da stres dayanıklılığı olarak adlandırılan bu potansiyel bitkinin bazı kısımlarına ve içinde bulunduğu büyüme ve gelişme dönemine göre değişiklik gösterebilir. Örneğin fide gibi genç bitkiler olgun bitkilere göre strese karşı daha duyarlıdır. Bitkilerin tohum, tomurcuk ve dormant hücreler gibi bazı bölümleri strese daha dirençliyken; aktif meristem ve sukulent organlar gibi bazı bölümleri ise strese daha az dirençlidir (Hale ve Orcutt,1987).



**Şekil 2.1.** Bitki gelişimine etki eden stres faktörleri ve aralarındaki etkileşim (Doğru, 2006).

Herhangi bir stres faktörüne karşı direnç için tek bir mekanizmanın olması beklenemez bir durumdur (Şekil 2.2). Stres direncinin farklı tip reaksiyon mekanizmalarını devreye sokan önemli çeşitlerinden biri sakınma diğeri ise toleranstır. Sakınmada ortamda stres oluşturan faktörler olmasına rağmen, bitki fizyolojik, mekanik ya da morfolojik bir etkenle hücrelerini strese sokmayan bir iç ortam hazırlar. Böylece hücrelerin stres faktörüyle termodinamik etkileşimi önlenmiş olur. Örneğin kaktüsler, içsel su seviyelerini, sahip oldukları sukulent organlarıyla koruyarak kuraklıktan sakınmış olurlar. Toleransta ise bitki hücreleri stres faktörü ile termodinamik bir etkileşim içerisindedir ve bitki canlılığını koruyabilmek için özel biyolojik mekanizmalar geliştirir. Aynı zamanda tolerans bitkinin strese dayanma kapasitesi olarak da yorumlanabilir. Örneğin karayosunları çoğu bitkiye göre kuraklık anında aşırı susuzluğa dayanabilir (Kadıoğlu, 2007). Tolerans esnasında bitki ya hiç zarar görmez ya da oluşan zararlar onarılabilir düzeydedir (Hale ve Orcutt, 1987). Örneğin ekstrem soğuklardan birçok tür, toprak ya da kar altında kalarak korumuş oldukları yeraltı meristemleri ile hayatta kalır. Bitiler bu şekilde strese karşı soğuktan sakınmış (kaçınmış) olur. Soğuk karşısında tolerans şeklinde cevap oluşturan türlerde ise ekstraselüler alanlarda bir miktar buz oluşturularak soğuğa dayanmaya çalışılır (Levitt, 1980; Steponkus, 1984; Sakai ve Larcher, 1987).



**Şekil 2.2.** Bitkilerde çeşitli stres faktörlerine karşı oluşturulan stres cevapları (Doğru, 2006).

Canlılar yaşadığı ortamda uzun süreli çevresel değişkenlere maruz kaldıklarında hayatta kalabilme becerilerini artıran genotipik cevaplar oluşturur (Huner ve ark.,

1998). Bu genotipik cevaplar canlıda birtakım yapısal, fizyolojik ve davranışsal değişimler meydana getirir (Kadıoğlu, 2007). Adaptasyon olarak tanımlanan bu genotipik değişimler o canlı için stabildir ve popülasyon içinde kuşaktan kuşağa aktarılmaya devam eder (Huner ve ark., 1988). Stres dayanıklılığının genetik temeli üzerinde yapılan çalışmalarla genetik adaptasyon iki şekilde sağlanabilir. Bunlardan ilki dayanıklı genotipler elde etmek; ikincisi ise istenilen farklı çevrelere adapte olan çeşitli fenotipleri sağlayacak genleri geliştirmektir (Kadıoğlu, 2007). Aklımasyon (uyum) ise organizmanın genetik yapısında bir değişiklik gerçekleşmeksizin, farklılaşan yaşam şartları karşısında verilen fenotipik cevaplardır (Huner ve ark., 1988). Soğuğa aklime olmuş *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. (Brassicaceae) türünün dayanıklı olan bireylerinde, yeni polipeptitlerin saptanması bu duruma örnek olarak verilebilir (Salisbury ve Ross, 1992).

### **2.3. Bitki Beslemesinde Kullanılan Makro ve Mikro Elementler**

Bitkide büyüme ve gelişim, genetik faktörler (Hrivnák ve ark., 2017; Housset ve ark., 2018) ile çevresel faktörlerin etkileşimi sonucu meydana gelir (Koç, 2022a; Li ve ark., 2020; Mu ve ark., 2022) ve bu süreçteki her aşamada bitki besin elementlerinin önemi büyüktür (Abdelaal ve ark., 2021; Bayraklı, 1987).

Bitkilerin sağlıklı bir şekilde büyüüp gelişebilmesi için çeşitli elementleri içeren besin tuzlarına ihtiyacı vardır. Besin tuzları makro ve mikro besin elementleri olarak iki grupta incelenir. Bitkilerin daha çok miktarlarda gereksinim duyduğu; azot, fosfor, potasyum, kalsiyum, kükürt, ve magnezyum gibi elementler makro element olarak adlandırılır. Bitkilerin az miktarlarda ihtiyaç duyduğu sodyum, klor, molibden, bakır, bor, mangan, çinko, nikel ve demir ise mikro element olarak adlandırılır (Bayraklı, 1987). Makro ve mikro besin elementlerin eksikliği ya da fazlalığı bitkinin içsel yapılarında ve dış görünümünde çeşitli olumsuzluklara yol açar. Örneğin azotun (N) eksikliği özellikle alt yaprakların sararmaya başlamasına neden olurken, fazlalaşması ise bitkide vejetatif gelişimi oldukça hızlandırır. Magnezyumun (Mg) azalmasıyla bitkide alt yapraklar tümüyle sararırken, yaprağın damar bölümleri yeşil kalmaya devam eder. Kalsiyum (Ca) yokluğunda hücre zarı geçirgenliği özelliği bozularak hücre içindeki bazı maddelerin dışarı sızmasına neden olur (Kadıoğlu, 2007).

Bitkilerde besin elementleri (mineral besinler) osmotik, yapısal ve biyokimyasal olmak üzere birçok farklı fonksiyonu yerine getirmektedir. Örneğin bitkiler hücre

içerisindeki mineral konsantrasyonlarını, topraktaki besin çözeltilisinden çok daha fazla tutarak; hücre içi osmotik basınçlarını artırır. Elementlerin osmotik fonksiyonu sonucu gerçekleşen bu durumla; hücreye su girişi sağlanarak; bitkinin büyümesi, stomaların açılıp-kapanması gibi birçok önemli olayın gerçekleşmesi için gerekli olan turgor hali oluşturulur. Bunun yanında azot, kükürt, fosfor gibi elementlerin DNA, RNA, enzim ve koenzim gibi birçok olayda kilit rol oynayan organik moleküllerin önemli bir bileşeni olması; kalsiyum gibi bazı elementlerin hücre çeperinin ve hücre zarının yapısal özelliklerini ve fonksiyonlarını sürdürmede aktif rol alması elementlerin yapısal fonksiyonu sonucunda gerçekleşen durumlara örnektir. Elementlerin biyokimyasal fonksiyonları çok çeşitli olmakla beraber genel olarak enzimlerin substrata etki etmesi için katyon ihtiyacını ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  gibi) ve bazı enzimlerin aktifleşebilmesi için kofaktör (örn.:  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$  gibi) ihtiyacını karşılaması; sentezi için fosfata ihtiyaç duyulan bileşiklerin solunum ve fotosentez metabolizmasında önemli rollere sahip olması örnek olarak verilebilir (Kadıoğlu, 2007).

Kalsiyum, magnezyum ve potasyum elementleri bitki büyümesi ve gelişimi için oldukça önemli olan makro besinlerdendir. Kalsiyum hücre bölünmesindeki önemli görevlerinden dolayı mitoz bölünmeyi etkilemektedir. Kalsiyum bölünme sırasında; mitotik iplikleri ve bölünme sırasında oluşan hücre plağının ara lamelinde kalsiyum pektatları oluşturur. Ayrıca hücre zarı ve lipit yapılarının özelliklerini ve fonksiyonlarını sürdürmesine yardımcı olması; bazı hormonal ve çevresel cevaplarda sekonder mesajcı rolünü üstlenmesi; ATPaz gibi bazı enzimlerin aktivatörü olması kalsiyumun önemli işlevlerindedir. Kalsiyum eksikliğinde mitoz bölünmede aksaklıklar meydana gelir, karbohidrat taşınımı yavaşlar; kök ve gövde uçlarındaki meristem dokular canlılığını kaybeder. Buna bağlı olarak kök ve gövde büyümesi durur, bitki bodur kalır. Magnezyum, klorofil yapısına katılan porfirin halkasının merkezinde yer almasından dolayı klorofil sentezinde önemli bir elementtir. Ayrıca nükleik asit sentezi ve karbohidrat metabolizmasında görevli çoğu enzimin ve yine fotosentezin karbon fiksasyonunda görev alan bazı enzimlerin (rubilozdifosfat ve fosfoenol pirüvat karboksilaz) aktivatörüdür. Diğer bir fonksiyonu ise ribozom organelinin yapısal olarak kararlılığını korumasına yardımcı olmaktır. Potasyum ise özellikle stoma hücrelerinin osmotik potansiyelini düzenleyerek stomaların açılıp kapanmasını sağlar. Ayrıca bitkilerde bu elementin en çok bulunduğu yerin

meristematik dokular olması, potasyumun peptit bağının oluşumunu sağlayan enzimlerin aktivatörü olduğunu düşündürmektedir. Çünkü potasyum eksikliğinde bitkilerin normal seviyelerde protein sentezi yapamadığı ve bu yüzden karbohidrat depo miktarının arttığı tespit edilmiştir (Kadıoğlu, 2007)

Doğada bulunan çoğu element bitki için gerekli olsun ya da olmasın, bitkisel dokularda yapılan analizlerde karşımıza çıkar. Bitkiler besin elementlerini alma konusunda ne kadar seçici olsalar da, yetişme ortamından yararlı besin elementlerini alırken, bitki hücrelerine pasif yolla geçebilen metalleri de bünyelerine katarlar (Dubey ve ark., 2018; Morkunasve ark., 2018). Besin elementlerinden bazıları (O, C, H, P, K, N, S, Mg, Ca, Fe, Mn, Zn, Cu, Cl, B ve Mo) her bitki için neredeyse gerekli; bazıları ise (Co, Al, Na, Si, Ni ve V) belirli bitkilerde ya da belirli proseslerde gereklidir. Bunun yanında ağır metal sınıfında yer alıp bitkiler için besin elementi özelliği gösterenler (Zn, Fe, Cu, Ni ve Mn gibi) olduğu kadar bitki için gereksiz olan ve bitki tarafından alındığında düşük miktarlarda bile toksik etki gösterenler de (Al, As, Cd, Cr ve Pb gibi) vardır (Dubey ve ark., 2018; Morkunas ve ark., 2018; Rahman ve ark., 2018). Bir besin elementinin toksik etki göstermesi daha çok eşik değeri aşp aşmaması ile ilgilidir. Bitki büyümesi ve gelişimi için mutlaka ihtiyaç duyulan makro ve mikro besin elementlerinin bile eşik değer üzerindeki yüksek miktarları canlı için toksik etkiler oluşturmaktadır (Ghori ve ark., 2019; Kumar ve ark., 2021; Yaashikaa ve ark., 2022). Ağır metal elementleri ise ister besleyici olsun ister olmasın düşük dozlarda bile (Pb, Cr, Ni, Hg gibi) canlı organizmalar için çok zararlı etkiler oluşturabilmektedir (Cobanoğlu ve ark., 2023; Ghori ve ark., 2019; Isinkaralar ve ark., 2022; Jamla ve ark., 2021). Bu yüzden bitkiler, ihtiyaç duyduğu mikro besin elementlerini eşik değerde tutabilmek ve gereksiz olan ağır metallere etkileşimini en aza indirmek için çeşitli savunma mekanizmaları geliştirir (Dalvi ve Bhalerao, 2013).

Stres faktörlerinden, özellikle endüstri ve sanayi çalışmaları ile ortaya çıkan çevresel kirleticiler, aşırı gübreleme, toprak asitliği; toprakta çeşitli ağır metal elementlerinin birikimini artırır ve bu birikim bitkilerin büyüme, gelişim ve fizyolojileri üzerinde oldukça toksik etkiler oluşturur (Koç, 2022b; Wild,1988). Bu toksik etkilerden biri de makro ve mikro besin elementlerinin su yardımıyla hücre içine alınmasındaki aksaklıklardır ve buna bağlı olarak da bitki büyüme ve gelişiminin kesintiye uğramasıdır (Koç ve ark., 2022; Mansoor ve ark., 2021).

## 2.4. Alüminyum

Alüminyum adını ilk keşfedildiği yer olan Alp'lerdeki Baukslar'dan almıştır. Doğal şartlarda kaolinler, feldspatlar, yaprak kayaçları ve kil mineralleri şeklinde bulunmaktadır (Kacar, 1972; Petrucci, 1985; Sevinç, 2003). Alüminyum kolay şekillendirilebilen, hafif (düşük yoğunluklu), elektrik ve ısı iletkenliği yüksek, amfoter özellik gösteren, dış etkenlere (oksidasyon, korozyon gibi) ve değişik iklim şartlarına karşı dayanıklı, renklendirilebilmesi kolay ve bakımı düşük maliyetli bir metaldir. Bu nedenle havacılıkta, otomotivde, askeri ve elektronik uygulamalarda, panel ve içecek kutularının yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Martinez ve ark., 2017; Rahimian ve ark., 2011; Sharma ve ark., 2015).

Alüminyum (Al) atom numarası 13, atom ağırlığı 26,98 g/mol olan +3 değerlikli bir metalik element olup periyodik cetvelin 3A grubunda yer alır. Oda sıcaklığındaki yoğunluğu ise 2,7 g/cm<sup>3</sup>'tür (Şenel ve ark., 2015). Ağır metal tanımı fiziksel açıdan, yoğunluğu 5 g/cm<sup>3</sup>'den ve atom numarası 20'den yüksek metaller için kullanılsa da; biyolojik açıdan genellikle çevre üzerinde kirlilik oluşturan ve toksik etkisi fazla olan metaller için de kullanılmaktadır (Duffus, 2002). Bu açıdan bakıldığında alüminyumun bazı formlarının bitkilerde ağır metal stresine neden olduğu söylenebilir.

Alüminyum, O<sub>2</sub> ve Si (Silisyum)'dan sonra dünyada en fazla bulunan ve bitki beslenmesinde gerekli olmayan bir element olarak bilinir. Yer kabuğu kütlelerinin ise yaklaşık %8'ini oluşturur. Alüminyumun toksik forma dönüşmesi daha çok toprak pH'sına bağlı olarak almış olduğu formla ilgilidir. Alüminyum, pH değeri 4,5-5'in altında olan asitli topraklarda en zehirli formu olan Al<sup>+3</sup> formunda (Al(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub><sup>+3</sup>) bulunur. Alüminyumun bu formu toprak suyu içinde çözünebilme özelliği gösterir. Çözünmüş alüminyum bitkilerin kökleri tarafından absorbe edilir ve bitkide çeşitli zararlara neden olur. Alüminyum, nötr ya da bazik topraklarda ise suda çözünürlüğü çok az olan Alüminyum silikat veya Alüminyum oksit formundadır. Bu formlar bitkide ciddi bir hasara neden olmaz (Matsumoto, 2000; Matsumoto ve Motoda, 2013; Sade ve ark., 2016).

Topraktaki asitlik oranı arttıkça, alüminyumun çözünürlüğü de artar. Çözünmüş Al konsantrasyonu genellikle 10-100 µM arasında değişen asitli topraklar, bitkilerde büyümeyi engelleyen önemli bir etkidir (Čiamporová, 2002; Foy, 1992). Bu durum, toprakta Ca ve Mg eksikliği de varsa kendini daha da şiddetli gösterir (Vitorello ve

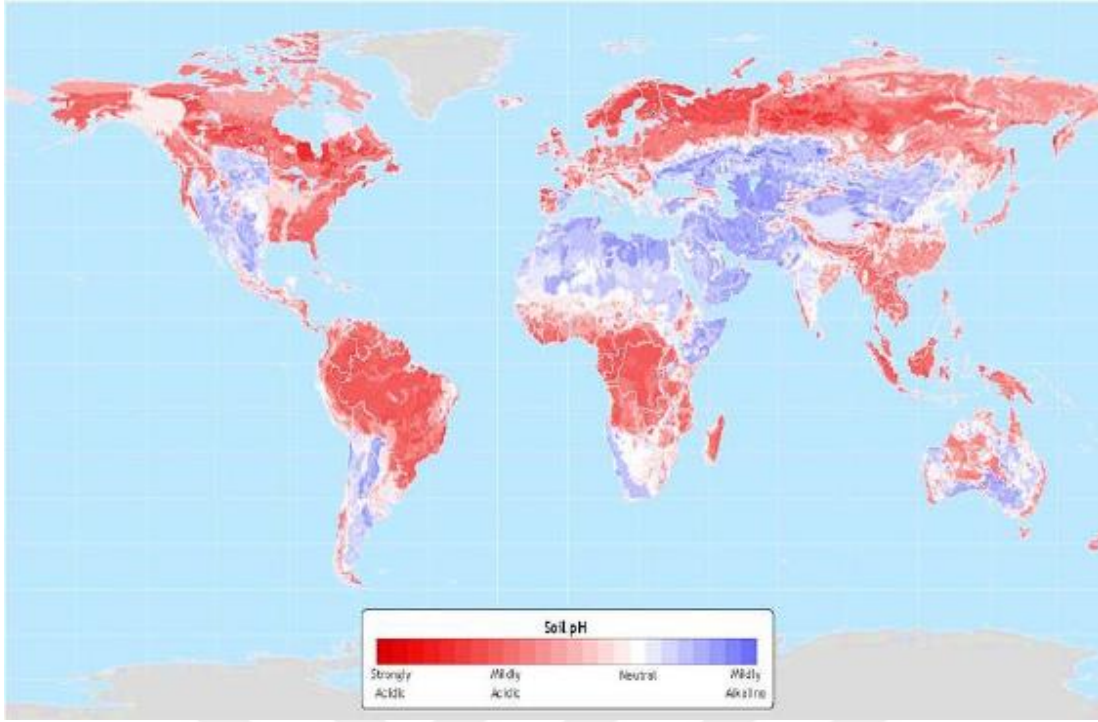
ark., 2005). Yapılan alışmalar, genellikle 1 ppm üzerinde çözünmüş alüminyum içeriği olan toprakların bitkiler için toksik etki oluşturduğunu göstermiştir. Bu topraklarda yetişen bitkilerde büyüme ve gelişim gerilikleri; ürün veriminde azalmalar olduğu tespit edilmiştir (Kochian, 1995; Li ve ark., 2016; Li ve ark., 2000; Matsumoto, 2000; Sade ve ark., 2016; Vardar ve ark. 2006; Thornton ve ark. 1986).

Al toksisitesi asitli topraklarda bitki büyümesi ve gelişimi için dünya çapında temel sorunlardan biri haline gelmiştir (Ma, 2000; Nunes-Nesi ve ark., 2014; Poschenrieder ve ark, 2008). Dünya üzerindeki, potansiyel ekilebilir alanların yaklaşık %67'sinin (Abate ve ark., 2013; Von Uexkull ve Mutert, 1995); tarımı yapılan alanların ise yaklaşık %30-50'sinin doğal bir şekilde asidik özellik gösterdiği tahmin edilmektedir (Kochian ve ark., 2004). Türkiye'de ise Karadeniz bölgesinin topraklarında doğal yapısında asidik özellik görülmektedir (Ayaz, 2001; Vardar ve ark., 2011). Şekil 2.3 dünya topraklarındaki pH dağılımını göstermektedir.

Dünya üzerindeki toprakların belirli bir bölümü doğal olarak asidik özellik gösterse de çeşitli çevresel etkenler ve endüstri faaliyetleri nedeniyle sonradan da asidik yapıya dönüşebilir. Sanayi kirliliği, egzost gazı, asit yağmurlarının oluşumu, su arıtımında kullanılan kimyasal içerikler ve ürün verimliliğini artırmak için yüksek dozlarda kullanılan amonyum bazlı gübreler topraktaki asitlik oranını artırmakta ve Al toksisitesine neden olmaktadır (Matsumoto, 2000; Vardar ve Ünal, 2007; Wang ve ark., 2006a; Wild,1988).

#### **2.4.1. Alüminyumun bitkiler üzerine etkileri**

Alüminyumun bitki üzerindeki toksik etkileri; bitkinin türüne, yetiştiği ortamın pH değerine, Al iyonunun derişimine ve strese maruz kalınan süreye göre değişkenlik gösterir (Delhaize ve Ryan, 1995).



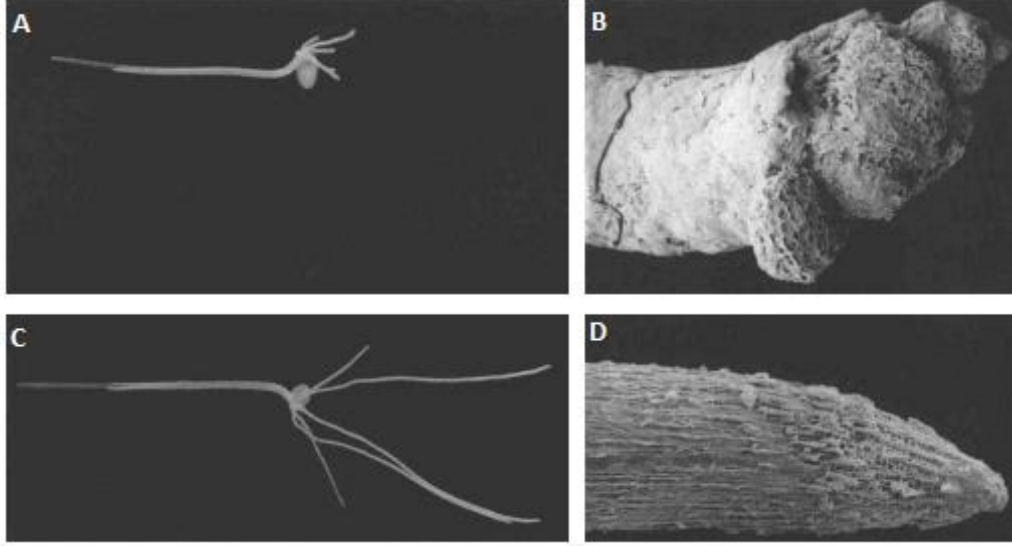
**Şekil 2.3.** Dünya topraklarındaki pH dağılımı (IGBP-DIS, 1998).

Bian ve ark. (2013) bitkilerde Al toksisitesinin neden olduğu etkileri morfolojik ve fizyolojik olarak iki gruba ayırarak incelemiştir. Bitki dokularında stres sonucu meydana gelen görsel semptomlar morfolojik etkilere; metabolik ve işlevsel değişimler ve bunlara bağlı olarak meydana gelen diğer semptomlar ise fizyolojik etkilere örnek verilebilir.

Al toksisitesinden ilk etkilenen bitkisel organ köktür (Hasenstein ve Evans, 1988). Kök uçları alüminyum iyonlarını alma mekanizmasında ve birikiminde önemli bir rol oynamaktadır. Alüminyuma maruz bırakılan köklerin anatomik yapısı incelendiğinde, özellikle kök korteksinde yer alan hücrelerin (epidermis ve parankima hücreleri) kontrol gruplarına göre hücre uzunluklarında azalma, hücre çaplarında ise artma tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu hücrelerin primer çeper yapısının, fenolik bir bileşik olan ligninin katılması sonucu sekonder çeper yapısına dönüştüğü belirtilmiştir. Birçok araştırmacı tarafından bu durumun kök uzamasını baskıladığı düşünülmektedir. (Delhaize ve Ryan, 1995; Matsumoto ve ark., 1996; Sasaki ve ark., 1996; Vardar ve ark., 2011). Aynı zamanda, alüminyumun, kök solunumunu engellediği, sitokininlerin sentezini ve taşınmasını azalttığı bilinmektedir (Ashenef, 2014).

Bitki tarafından absorbe edilen alüminyumun bir bölümü, kök şapkası ve meristematik alandan geçiş yaparken büyük bir bölümü epidermisten ve korteksten içeriye geçerek

apoplastik ve simplastik hedeflerle etkileşir (Rout ve ark., 2001). Bunun sonucunda kök apeksinin morfolojisi değişime uğrar. Kısılma, kalınlaşma, şişme ve çatlama gibi durumlarla birlikte kökte dallanmalar ve kök tüylerinde azalmalar gözlenir (Čiamporová, 2002; Vardar ve ark., 2006; Vardar ve ark., 2011). Şekil 2.4 Al'un kök büyümesi ve yapısı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 2.4.** Alüminyum toksisitesi sonucu zarar görmüş kök (A) ve kök ucu (B) ile sağlıklı kök (C) ve kök ucu (D) (Delhaize ve Ryan., 1995).

Toksik Al iyonları köke ulaştığında ilk etkileşime geçtiği yer hücre çeperidir (Singh ve ark., 2017). Alüminyum iyonları genellikle hücre çeperindeki pektin matriksinin negatif yüklü olan karboksil gruplarıyla bağ kurar (Blamey ve ark., 1993). Pektinle yapılan bu çapraz bağlar hücre çeperinin sertliğini artırır (Eekhout ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2014).

Al aynı zamanda hücre zarının lipitlerine bağlanarak zarın elektriksel potansiyelini değiştirir ve zarda pozitif yüklü bir tabakanın oluşmasını sağlar. Bu durum hücrenin çeşitli iyonlara karşı seçici geçirgenliğinde bozulmalara yol açarak hücrenin katyon değişim kapasitesini etkiler (Kochian ve ark., 1991; Zhao ve ark., 1987). Kök hücrelerinin zarında iyon taşımakla görevli olan kanal proteinlerinin fonksiyonları bozulur.  $Mg^{+2}$ ,  $K^{+}$  ve  $Ca^{+2}$  gibi bazı katyonların kökten alınımı azalırken, çeşitli anyonların alınımı artar. Böylece bitki topraktan gerekli olan besin elementlerini alamaz duruma gelir (Bose ve ark., 2011; Hufnagel ve ark., 2018; Jones ve ark., 2006; Zhang ve ark., 2007).

Araştırmacılar özellikle alüminyumun, önemli bir fosfolipit çeşidi olan fosfatidil kolin yüzeyine bağlanma çekim gücünün Ca iyonlarına göre çok daha fazla olduğunu saptamışlardır (Kochian ve ark., 1991; Zhao ve ark., 1987). Bu nedenle alüminyumun hücre zarından içeri geçmesiyle, hücrenin içindeki Ca dengesinin bozulduğu ve özellikle inositol-1,4,5-trifosfat (IP3) olmak üzere inositol fosfat seviyesinin düştüğü gözlenmiştir (Rengel, 1992).

Al toksisitesi sebebiyle kalsiyum kıtlığı çeken bitki yapraklarının kk ve kıvrımlı olduğu; yaprak büyümesi ve yeniden yaprak oluşturma özelliklerinde ise azalmalar olduğu grlmştir (Tok, 1996). Al toksisitesinin; toplam yaprak sayısını ve stomatal açıklığı azalttığı, sürgün biyokütlesinde gerilemeye neden olduğu belirtilmektedir. Ayrıca bitkinin çoğu kısmında anatomik ve yapısal deformasyonlara; nekroz ve kloroz gibi olumsuzluklara neden olmaktadır. Bitki hücrelerinde kloroz nedeniyle fotosentez aktivitesi dş gösterir (Vardar ve ark., 2018). Arpa, buğday, mısır ve avdar gibi tarım bitkilerinin yaprak fotosentez hızının alüminyumun etkisiyle düştüğü belirtilmiştir (Dawood ve ark., 2012; Silva ve ark., 2012; Zhao ve ark., 2017). Buğdayla ilgili yapılan bir çalışmada yapraklarda gerçekleşen Al kaynaklı fotosentez inhibisyonuna; fotosistem II (FS II) merkezinin kapatılması, fotosentetik elektron taşıma sisteminde yaşanan aksaklıklar ve tilakoit zarda gerçekleşen asitleşme neden olarak gösterilmektedir (Moustakas ve ark., 1995).

Alüminyum birçok bitkide DNA replikasyonunu yavaşlatarak hücre bölünme hızını azaltır (Eekhout ve ark., 2017). Hücre çekirdeğinde yüksek oranda bulunan negatif yüklü fosfatlar, pozitif yüklü alüminyum iyonlarının çekirdeğe doğru ilerleyerek burada birikmesine neden olur. Alüminyum iyonları burada kromozomal DNA ile etkileşime geçerek mitoz bölünmenin inhibisyonuna neden olur (Matsumoto, 2000; Vardar ve ark., 2011). Araştırmacılar, yapılan birçok çalışmada Al'a maruz bırakılmış bitki köklerinde ilk 30 dakikada DNA molekülünde hasar ve fragmentasyonlara rastlamışlardır (Vardar ve ark., 2016).

Alüminyum toksisitesinin önemli bir sonucu da AOT (Aktif Oksijen Türü) miktarını artırarak bitkilerde oksidatif strese neden olmasıdır. Hücrede biriken AOT lipid peroksidasyonu ve hücre membranının zarar görmesi gibi birçok hücresel olayı tetikler. Yapılan bir çalışmada arpaya (*Hordeum vulgare*) Al uygulanması sonucu AOT miktarının arttığı ve bitkinin oksidatif strese girdiği gözlenmiştir. Ayrıca arpada

Al kaynaklı programlı hücre ölümü yoğunluğunda artış olduğu tespit edilmiştir (Pan ve ark., 2001).

#### **2.4.2. Alüminyum toksisitesine karşı geliştirilen cevaplar**

Dünya genelindeki asitli toprak miktarı düşünüldüğünde tarım arazilerindeki bitkisel verimi ve kaliteyi artırmak için alüminyuma dirençli, tolerans mekanizması güçlü olan bitkilerin tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Kochian ve ark. (2015) bitkilerin alüminyum toksisitesine karşı geliştirmiş oldukları dirençlilik mekanizmalarını ikiye ayırarak incelemiştir. Birincisi (dışsal mekanizma) alüminyumun kök simplastına girişinin engellenerek dışarıda tutulmasıdır. İkincisi (içsel mekanizma) ise alüminyumun toksik etkilerinin hücre içerisinde elimine edilmesidir. Her iki mekanizma için de bitki tarafından üretilen organik asitlerin önemli rollere sahip olduğu tespit edilmiştir (Barceló ve Poschenrieder, 2002; Ma ve ark., 2014).

Alüminyum uygulamasına maruz bırakılan birçok bitki türü, tepki olarak köklerinden çeşitli organik asitler salgılar. Kök rizosferinde çözülmüş halde bulunan Al iyonları, bu organik asitlerin karboksil grupları ile tepkimeye girerek bitki için zararsız olan kompleks bileşiklere dönüşür (Ryan ve ark., 1993). Organik asitlerle alüminyumun bu şekilde şelatlanması, Al iyonlarının kök hücre çeperine ve hücre zarına bağlanmasını engeller (Vardar ve Ünal, 2007). Bunun yanında simplastik ve apoplastik kısımlarda toksik Al iyonlarının birikmesi ve kökte kompleks şelat oluşumunun kök rizosferinden dışarı sızmasını önlemek için bitki kökleri tarafından müsilaj kılıf oluşturulması da önemli mekanizmalardan biridir (Barceló ve Poschenrieder, 2002; Vardar ve Ünal, 2007). Ayrıca organik asit dışında karboksilat, fosfat, çeşitli fenolik maddeler, pektatlar ya da mukopolisakkaritlerin de alüminyum iyonları ile güçlü kompleks bileşikler oluşturduğu tespit edilmiştir (Marschner, 1995; Winkler ve ark., 1986).

Topraktaki toksik miktarda çözülmüş Al iyonlarına karşı, kökler tarafından salgılanan organik asit çeşitleri bitkilerin alüminyuma tolerans durumuna göre değişiklik gösterebilir. Malat ve sitrat bitkilerde en çok rastlanılan organik asitlerdendir (Vardar ve Ünal, 2007). Örneğin yapılan çalışmalarda alüminyuma toleranslı olan buğday çeşitlerinin malat (Ryan ve ark., 2010); baklagillerin ise sitrat (Yang ve ark., 2007) salgıladığı görülmüştür. Yapılan çalışmalarda eksojen olarak uygulanan organik asitlerin, alüminyumun neden olduğu kök büyüme sorununu ve hücre üzerindeki

toksik etkiyi azalttığı bildirilmiştir (Li ChaoSu ve ark., 2006; Metwally ve ark., 2003; Yang ve Zhang, 1998).

Toksik alüminyum iyonlarının zararlı etkilerinin azaltılmasında, hücre çeperinde Al iyonlarının bağlandığı bazı bileşiklerin içerik olarak azaltılmasının da etkili stratejilerden biri olduğu söylenebilir. Pirinçle yapılan bir çalışmada amonyum uygulamasının kök hücre çeperindeki pektinleri azalttığı; bu azalışla beraber hücre çeperinde Al iyonu birikiminin de azaldığı gözlenmiştir (Wang ve ark., 2015). Aynı strateji *Arabidopsis* köklerinde bulunan hemiselüloz içeriği için de geçerlidir (Yang ve ark., 2008, 2011).

Yüksek yapılı bitkilerin alüminyum toksisitesine karşı geliştirmiş olduğu içsel mekanizmalarda ise hücre içine giren toksik Al iyonları vakuollerin içerisinde ya da apoplastta biriktirilir. Organik asit anyonları, fenolik maddeler ve silikon gibi ligantlar; alüminyum iyonları ile stabil ve zararlı olmayan kompleks bileşikler oluşturur. Bazı bitki türlerinin yaprak ve gövdelerinde yüksek miktarlarda alüminyum birikimi bu şekilde ortaya çıkmıştır (Barceló ve Poschenrieder, 2002; Ma ve ark., 2014).

Bunun yanında Al toksisitesine karşı geliştirilen diğer bir cevap; askorbat peroksidaz (APOD), guaiakol peroksidaz (GPOD), glutatyon peroksidaz, süperoksit dismutaz (SOD) ve katalaz (KAT) gibi antioksidant enzimlerin aktivitesindeki artıştır. Alüminyumun uyardığı genlerin ürünü olan bu antioksidant enzimler, hücrede toksik Al iyonlarının neden olduğu aktif oksijen türlerinin (AOT) zararlarını azaltmaya çalışır (Wang ve Yang, 2005; Zhang ve ark., 2010). Antioksidant enzim artışının Al toksisitesi ile olan ilişkisinin anlaşılması amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda, Al'un buğday (Cruz-Ortega ve ark., 1997; Snowden ve ark., 1993), *Arabidopsis* (Richards ve ark., 1998) ve tütünde (Ezaki ve ark., 2008) yirmiden çok geni uyardığı tespit edilmiştir. Bu genler, farklı çevresel streslerin (fosfat eksikliği, farklı metallerin toksisitesi, ozon stresi ve oksidatif stres gibi) etkisiyle uyarılanlara benzemektedir (Richards ve ark., 1998). Ezaki ve arkadaşları (2000), transgenik *Arabidopsis* ile yaptıkları çalışmada alüminyumun indüklediği genlerin, bitkiyi Al stresıyla beraber oksidatif stresin etkilerinden de koruyabildiğini bildirmişlerdir. Soya fasulyesiyle yapılan bir çalışmada Al stresinin katalaz aktivitesinde (KAT) azalmaya; peroksidaz (POD) ve süperoksit dismutaz (SOD) enzimlerinin aktivitelerinde artışa sebep olduğu raporlanmıştır (Cakmak ve ark., 1991). Tütün bitkisi kullanılan diğer bir çalışmada ise

Al stresinin bitki hücrelerinde POD enziminin aktivitesini artırdığı bildirilmiştir (Ezaki ve ark., 1995).

## 2.5. Bitkilerde Oksidatif Stres

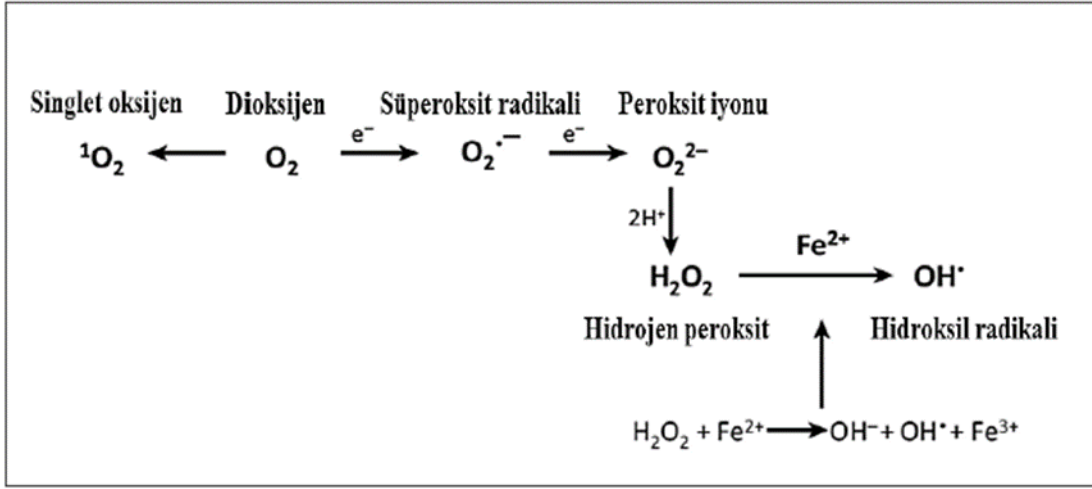
Bitkilerde ağır metal toksisitesinin neden olduğu önemli zararlardan biri de; aktif oksijen türlerinin (AOT) kontrolsüz bir şekilde artışına bağlı olarak oksidatif strese neden olmasıdır (Uysal, 2007; Ayhan, 2006).

Aktif oksijen türlerinin (AOT) kaynağı atmosferik oksijendir ( $O_2$ ). Bitkiler dahil tüm aerobik canlılarda enerji metabolizmasının temel unsuru olan oksijen, özellikle bazı stres koşulları altında canlı için toksik etkileri olan potansiyel bir tehlikeye dönüşmektedir (Alscher ve ark., 1997). Normal koşullarda yaşayan bitki hücrelerinin ihtiyaç duydukları enerjiyi oksijeni suya tam olarak indirgeyerek sağlarlar. Oksijenin suya tam olarak indirgenemediği durumlarda ise oldukça reaktif olan AOT'ler oluşur. Bunun sebebi serbest radikal olarak oksijenin, temel durumdayken ( $O_2$ ) eşlenmemiş iki elektronu sayesinde su dışındaki diğer moleküllerle de kolayca elektron alışverişi yaparak indirgenebilmesidir (Dat ve ark., 2000).

Bitkilerde serbest radikal olarak AOT'ler; membrana bağlı elektron iletim aktiviteleri dahil (Çakır, 2007), kloroplast (fotosentez sırasında), mitokondri (solunum sırasında) ve peroksizom gibi organellerde birkaç metabolik yolla ara ürün olarak açığa çıkar (Van Breusegem ve Dat, 2006). Bu serbest radikaller, metabolik tepkimeler sırasında radikal olmayan bir atom veya molekülden elektron ayrılması ya da elektron eklenmesi sonucu oluşmaktadır. Eşleşmemiş elektron ya da elektronlar içerdikleri için de oldukça reaktiftirler. Reaktif olan bu moleküller, başka moleküllerle elektron alışverişi yapabildiği için hücrede indirgeyici veya yükseltgeyici olarak rol üstlenirler (Flora, 2007)

Singlet (tekli) oksijen ( $^1O_2$ ), süperoksit anyonu ( $O_2^-$ ), hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ve hidroksil radikali ( $OH^-$ ) hücre içinde sık görülen aktif oksijen türlerindedir. (Gutteridge ve Halliwell, 1990). Atmosferik oksijen, enerji transferi ile çeşitli AOT'lerin oluşmasını sağlar (Şekil 2.5). Atmosferik oksijenin, bir elektronunu vererek indirgenmesiyle süperoksit radikali oluşurken; ekstradan enerji alıp kendi dönüş yönünün tersi yönünde farklı bir yörüngeye yer değiştirmesiyle singlet oksijen oluşur. Süperoksit anyonunun dismutasyon geçirmesi ile hidrojen peroksit açığa çıkar. Hidrojen peroksit de Fenton reaksiyonuyla  $Fe^{+2}$  ile etkileşime girerek hidroksil

radikalini açığa çıkartır (Büyükve ark., 2012; Das ve Roychoudhury, 2014; Mittler, 2017)



Şekil 2.5. Atmosferik oksijenden farklı AOT'lerin oluşması (Mittler, 2017).

AOT'ler, optimum koşullar altında gelişim gösteren bir bitkide bazal seviyelerde de olsa yan ürün olarak açığa çıkar, ancak bu durum önemli bir sorun oluşturmaz. Bitki hücreleri sahip olduğu farklı antioksidant mekanizmalarla, bazal seviyedeki AOT'leri hızlıca etkisiz hale getirir ve böylece AOT'lerin hücrede neden olabileceği hasarlardan kendini korur. Fakat ağır metal, kuraklık, tuzluluk gibi stres koşulları altında hücredeki AOT miktarı hızla artmaya başlar. AOT'lerin üretilmesi ve AOT'lerin antioksidant mekanizmalar tarafından etkisiz hale getirilmesi arasındaki denge bozulur. Belirli bir AOT miktarı aşıldığında ise toksik etki göstererek bitkide oksidatif strese neden olur (Das ve Roychoudhury, 2014; Ishtiyak ve ark., 2018).

AOT'lerin kontrolsüz artışı; hücre ve organel zarlarında lipit peroksidasyonuna, protein yapılı moleküllerin oksidasyonuna, enzimlerin inhibisyonuna, klorofil pigmentleri ve nükleik asitler gibi biyomoleküllerin zarar görmesine neden olmaktadır. Bu olumsuz durumların giderilememesi sonucunda ise programlı hücre ölümleri (apoptozis) gerçekleşmektedir (Büyük ve ark., 2012; Çakır, 2007; Smirnoff, 1993). Özellikle lipit peroksidasyonu sonucunda oluşan MDA (malondialdehit), oksidatif stres düzeyinin temel belirteci olarak kabul edilir (Juknys ve ark., 2012; Verma ve Dubey, 2003). MDA, hücre membranındaki iyon alışverişini etkileyerek iyon geçirgenliğini ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ) artırır, enzimatik değişikliklere, membran bütünlüğünün bozulmasına sebep olur (Montillet ve ark., 2005).

Stres altında yüksek miktarlardaki AOT bitkiler için büyük tehdit oluştursa da; düşük konsantrasyondaki AOT'lerin bitkide stres cevabında ve savunma yollarının aktifleştirilmesinde sekonder mesajcı (sinyal iletim molekülü) olarak da rol oynadığı belirtilmiştir (Uysal, 2007). AOT'lerin hasar verici ya da koruyucu sinyal iletim molekülü olarak işlev görmesi; AOT'nin oluşumu ile yok edilmesi arasındaki dengenin doğru yerde ve zamanda yapılmasıyla ilişkilidir (Gratão ve ark., 2005; Qamer ve ark., 2021). Bu dengede bir aksama görülür ve AOT miktarı aşırı artarsa diğer antioksidant mekanizmalar devreye sokularak bu aksaklık giderilmeye çalışılır (Çakır, 2007).

## **2.6. Bitkide Antioksidant Sistem**

Bitkilerin oksidatif stres altında, AOT'leri kontrol altında tutmak ve AOT'lerin toksik etkilerinden korunmak için geliştirmiş oldukları savunma sistemine, antioksidant sistem denmektedir. Antioksidant sistemde görev alan moleküller ise antioksidant olarak adlandırılır (Büyük ve ark., 2012; Elliott, 1999; Soydam Aydın ve ark., 2012). Antioksidantlar, düşük seviyelerde de oksidasyon yapabilen ve başka bir substratın oksidasyonunu elektron aktarımıyla inhibe edebilen, yani oksidasyonla mücadele edebilen moleküllerdir (Soydam Aydın ve ark., 2012). Antioksidant moleküller, enzimatik olan ve enzimatik olmayan olmak üzere iki grupta incelenir (Hasanuzzaman ve ark., 2020b; Scandalios, 1997; Mohammadi ve ark., 2021).

Enzimatik olan antioksidantlar daha çok hücre zarı ve organelleri AOT'nin zararlı etkilerinden korumaktadır (Uysal, 2007). Enzimatik olmayan antioksidantlar ise membranla ilişkili olup lipitte çözünür özellik gösterir ve düşük moleküler ağırlığa sahiptir (Soydam Aydın ve ark., 2012; Singh ve ark., 2007). Süperoksid dismutaz (SOD), katalaz (KAT), askorbat peroksidaz (APOD), guaiakol peroksidaz (GPOD), glutatyon peroksidaz (GPOX), glutatyon redüktaz (GR), dehidroaskorbat redüktaz (DHAR) ve monodehidroaskorbat redüktaz (MDHAR) enzimatik olan antioksidantlardır (Scandalios, 1997). Askorbik asit (vitamin C),  $\alpha$ -tokoferoller (vitamin E), karotenoidler, glutatyon ve fenolik bileşikler ise enzimatik olmayan antioksidantlardır (Gill ve Tuteja, 2010).

### **2.6.1. Enzimatik antioksidantlar**

Süperoksid dismutaz (SOD), tüm aerobik organizmalarda en etkili antioksidant enzimlerdendir. Bitki hücrelerinde AOT'lere karşı ilk savunma hattını

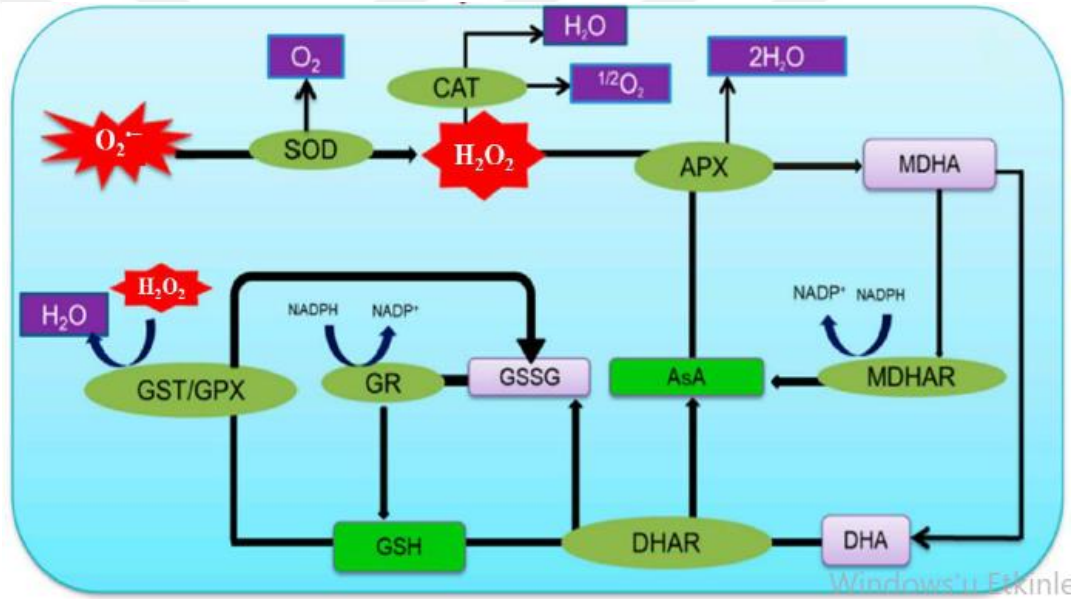
oluşturmaktadır. Süperoksit radikalinin hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ve moleküler oksijene ( $O_2$ ) dönüşmesini dismutasyon reaksiyonuyla katalizler (Karuppanapandian ve ark., 2011; Mehla ve ark., 2017). SOD ile süperoksit radikalının detoksifiye edilmesi Haber-Weiss reaksiyonu yoluyla hidroksil iyonu radikalının üretilme ihtimalini düşürür (Berwal ve Ram, 2018). SOD'nin katalizleyerek başlattığı bu reaksiyon, süperoksit radikalının enzimatik olmayan detoksifikasyonuna göre 10.000 kat daha hızlıdır (Kliebenstein ve ark., 1999). Aktif bölgelerindeki metal kofaktörüne göre üç farklı izozimi olan SOD 'ler hücrelerin kloroplast, mitokondri, peroksizom ve sitozol gibi farklı bölümlerinde işlev görmektedir (Del Río ve ark., 2018). Fe-SOD izozimi kloroplast, Mn-SOD izozimi mitokondri ve peroksizom, Cu/Zn-SOD izozimi ise kloroplast, peroksizom, sitozol ve hücreler arası boşlukta bulunmaktadır (Alscher ve ark., 2002). Çeşitli çalışmalarda, bitkilerin abiyotik stres karşısında SOD aktivitelerini artırdığı bildirilmiştir (Armendariz ve ark., 2016; Doğru, 2014; Yin ve ark., 2008). SOD aktivitelerindeki artış bitkilerin çoğunlukla strese karşı toleranslarının artmasıyla ilişkilendirilmiştir (Dar ve ark., 2017).

Askorbat peroksidaz (APOD), gelişmiş bitkiler de dahil olmak üzere birçok ökaryotta AOT seviyelerinin kontrol altında tutulmasını sağlayan en etkili antioksidant enzimlerden biridir (Anjum ve ark., 2016). APOD, bitki hücrelerinde su-su ve askorbat-glutasyon (AsA-GSH) döngüsünün bir bileşeni olup  $H_2O_2$ 'nin parçalanmasında görevlidir (Noctor ve Foyer, 1998). APOD bitkilerde sitozol, mitokondri, peroksizom ve kloroplast gibi çeşitli hücresel kısımlarda görev alır (Anjum ve ark., 2016). Farklı izozimleri olan APOD'ler, kloroplastın tilakoid membranlarında (tAPOD) ve glioksizom membranlarında (gmAPOD) membrana bağlı olarak; kloroplastın stromasında (sAPOD), mitokondride (mitAPOD) ve hücre sitoplazmasında (cAPOD) ise çözülmüş şekilde bulunur (Noctor ve Foyer, 1998).

APOD, SOD enziminin katalizlediği reaksiyon sonucu oluşan  $H_2O_2$ 'nin su ve oksijene kadar yıkılmasında görev alan askorbat-glutasyon döngüsünün birinci enzimidir (Asada, 1999). APOD, bu reaksiyonda indirgeyici molekül olarak askorbatı kullanır. Dehidroaskorbat redüktaz (DHAR) ve mono dehidroaskorbat redüktaz (MDHAR) enzimleri ise askorbatın yenilenmesini sağlar. Bu işlem sırasında MDHAR NADPH'yi, DHAR ise glutasyonu indirgeyici molekül olarak kullanır (Bowler ve ark., 1992; Jiménez ve ark., 1998; Noctor ve Foyer, 1998). Glutasyon redüktaz (GR) ise bu döngüsünün son enzimi olarak çalışır ve elektronunu vererek okside olmuş glutasyonu

NADPH'nin yardımıyla indirgemekten sorumludur (Asada, 1999). İndirgenen glutasyonun elektronları APOD enziminin  $H_2O_2$ 'yi parçalamasında kullanılır. Özetle APOD, GR, MDHAR ve DHAR  $H_2O_2$ 'nin detoksifikasyonunda görev alır (Şekil 2.6). Bitkilerde  $H_2O_2$ 'nin parçalanmasından sorumlu olan diğer bir enzim ise guaiakol peroksidazdır (GPOD). Bu enzim bitkilerde biyotik stres faktörleri altında antioksidant olarak işlev görmekle birlikte indol-3-asetik asit adlı bitkisel hormonu parçalamada ve hücre çeperlerindeki lignin biyosentezinde de etkilidir(Asada, 1999).

APOD'un  $H_2O_2$ 'ye olan ilgisi guaiakol peroksidaz (GPOD) ve katalaz enzimlerine göre daha yüksektir (Canavar, 2018). Yapılan bir çalışmaya göre bezelyede kadmiyum stresi kontrol grubuna göre APOD aktivitesini %180 oranında, nikel stresi ise %50 oranında artırmıştır (El-Amier ve ark., 2019).



Şekil 2.6. Askorbat-glutasyon döngüsü (Hasanuzzaman ve ark., 2020a).

Katalaz (KAT), hidrojen peroksidin su ve oksijene dönüşüm reaksiyonlarını katalize etmektedir (Sharma ve ark., 2012). KAT özellikle peroksisomlarda (%80); yağ asitlerinin  $\beta$ -oksidasyonu, pürin metabolizması ve fotorespirasyon sırasında açığa çıkan hidrojen peroksidin zararsız hale getirilmesinde görev almaktadır. Bir molekül KAT dakikada yaklaşık 6 milyon  $H_2O_2$ 'yi parçalayabilir (Baykal, 2006; Polidoros ve Scandalios, 1999). Ayrıca bazı bitkilerde mitokondri, kloroplast ve sitoplazmada da KAT'a rastlanmıştır (Anjum ve ark., 2016; Leung, 2018; Pan ve ark., 2022; Scandalios, 1990). Katalaz, ortamda  $H_2O_2$ 'nin derişimi düşükse ( $<10^{-6}$  M) peroksidatif;  $H_2O_2$ 'nin derişimi yüksekse katalitik özellik göstermektedir. Bununla

birlikte ekspresyon özelliklerine göre farklı sınıflara ayrılan katalazlara; fotosentetik dokularda (Sınıf I KAT), vasküler dokularda (Sınıf II KAT) ve reproduktif dokularda (Sınıf III KAT) rastlamak mümkündür (Pan ve ark., 2022). Metal toksisitesinin, katalaz dahil tüm antioksidant enzimler üzerine etkisini; bitkinin türü, yaşı doku çeşidi, metal çeşidi ve konsantrasyonu gibi faktörlerle strese maruz kalma süresi belirler (Anjum ve ark., 2016).

### **2.6.2. Enzimatik olmayan antioksidantlar**

Askorbik asit (AsA, Vitamin C), su içinde çözünebilen bir vitamin olup en etkili AOT temizleyicilerinden biridir. Bunun nedeni antioksidant savunma sisteminde enzimatik ve enzimatik olmayan birçok reaksiyonda ihtiyaç duyulan elektronu vererek indirgeyici rolünü üstlenmesidir (Smirnoff, 2000). İndirgenmiş formdaki askorbik asitin kısa süre içinde yeniden rejenerasyonu çok önemlidir. Çünkü okside halde bulunan askorbik asitin yapısı hızlı bir şekilde bozulur. Bitki hücrelerinde mitokondri, askorbik asitin üretilmesinde ve rejenerasyonunda en önemli rolü üstlenen organeldir (Szarka ve ark., 2007). Bununla birlikte askorbik asit, süperoksit, hidrojen peroksit ve hidroksil gibi AOT'leri etkisiz hale getirerek hücreyi koruma altına alır. Tokoperoksi radikallerinden  $\alpha$ -tokoferol oluşturarak, membranları serbest radikallerin verebileceği olası zararlardan korur. Violoksantin deepoksidaz enziminin kofaktörü olarak çalışır. Absorbe edilen aşırı ışık enerjisinin tüketilmesini sağlayarak fotosentetik birimlerin zarar görmesini engeller (Smirnoff, 2000). Hücredeki askorbik asitin %30-40 oranında kloroplast organelinde yer aldığı ve kloroplastın stromasında seviyesinin 50 mM'a ulaşabileceği rapor edilmiştir (Foyer ve Noctor, 2005). Yaprakta bulunan askorbik asit oranının, bitkilerin stres koşullarına toleransıya ilişkili olduğu belirtilmiştir. Yapılan bir çalışmada askorbik asit oranı çok olan kavak ve tütün bitkilerinde oksidatif stresin daha az olduğu bildirilmiştir (Aono ve ark., 1993; Foyer ve ark., 1994).

Glutatyon; glutamin, sistein ve glisin amino asitlerin birleşmesiyle meydana gelen bir tripeptittir. Bitkinin bütün hücrelerinde bulunabilen glutatyona hücrenin; sitoplazması, endoplazmik retikulumu, vakuölü, mitokondrisi, kloroplastı, apoplastı ve peroksizomlarında rastlanılabilir (Jiménez ve ark., 1998; Mittler ve Zilinskas, 1992). Bitkilerde glutatyonun antioksidant olarak işlev görebilmesi için indirgenmiş formda olması gerekir (Meyer, 2008). Tekli oksijen ( $^1\text{O}_2$ ), hidrojen peroksit ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ve hidroksil radikali ( $\text{OH}^\cdot$ ) gibi AOT'lerin potansiyel temizleyicisi olmasının yanında (Briviba ve ark., 1997; Larson, 1988; Noctor ve Foyer, 1998), stres koşulları altında

bazı genlerin ekspresyonunda ve askorbat-glutasyon döngüsünde görev almaktadır (Mullineaux ve Rausch, 2005; Rausch ve Wachter, 2005; Xiang ve ark., 2001). Çok yönlü fonksiyonlara sahip olan glutasyon ayrıca bitkilerde; sülfat ve amino asit taşınımını, sinyal iletimini, metabolitlerin bağlanması ile ksenobiyotiklerin yıkımını sağlar (Onat ve ark., 2002). Apoptosis olayında ve patojen direncinin kazanılmasında etkilidir (Khan ve Singh, 2008). Enzim regülasyonu ve ağır metal toksisitesi altında fitoşelatin yapımı gibi birçok önemli olayın gerçekleşmesinde rol oynar (Mullineaux ve Rausch, 2005; Rausch ve Wachter, 2005; Xiang ve ark., 2001).

$\alpha$ -tokoferol (Vitamin E), yağda çözünme özelliği gösteren hidrofobik bir antioksidant çeşididir. AOT'lerin ve lipid radikallerinin detoksifikasyonunda rol oynayarak fosfolipitlerin peroksidasyonunu ve hücre membranlarının zarar görmesini engeller (Gey ve ark., 1991; Hollander-Czytko ve ark., 2005). Özellikle kloroplastın tilakoid membranlarında konumlanan  $\alpha$ -tokoferoller,  $^1\text{O}_2$ 'yi detoksifiye ederek membranın stabilizasyonunu sağlamaya yardımcı olur. Ayrıca bitkilerde bulunan tokoferol izomerleri ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - ve  $\delta$ -) arasında sadece  $\alpha$ -tokoferoller üç metil grubuna sahiptir ve bu özelliğinden dolayı en kuvvetli antioksidant olarak kabul edilmektedir (Kamal-Eldin ve Appelqvist, 1996). Yapılan bir çalışmada, 1 molekül  $\alpha$ -tokoferolün yaklaşık 120 tane  $^1\text{O}_2$  molekülünü kısa bir süre içinde etkisizleştirerek lipidlerin otooksidasyon hızını yavaşlattığı rapor edilmiştir (Munné-Bosch, 2005). Yapılan diğer bir çalışmada oksidatif stres altındaki *Chlamydomonas reinhardtii*'nin fotosentetik aktivitesini koruya bilmesi için yüksek miktarlarda  $\alpha$ -tokoferole ihtiyaç olduğu belirtilmiştir (Trebst ve ark., 2002). Farouk (2011), tuz stresinin buğday yapraklarında neden olduğu senesensin,  $\alpha$ - tokoferol ile yavaşlatıldığını tespit etmiştir.

Karotenoidler, turuncu, sarı ve kırmızı renklerini veren kloroplast ve kromoplast organellerinin zarlarında bulunan doğal pigment yapısındaki antioksidantlardır (Bartley ve Scolnik, 1995). Bitkilerde en çok bulunan türevi ise vitamin A'nın öncü maddesi olan  $\beta$ -karotendir. Lipidlerde çözünür özellik gösteren karotenoidler, antioksidant savunma sisteminin bir parçası olmakla beraber birçok önemli işlevi yerine getirir (Siefermann-Harms, 1987). Örneğin üçlü uyarılmış klorofil molekülünü (klo3), singlet oksijen ve fotosentez sırasında açığa çıkan diğer AOT'leri detoksifiye eder ve lipid peroksidasyonunu azaltarak fotosentetik aygıtı ışığın etkisiyle ortaya çıkabilecek zararlardan korur (Collins, 2001). Ayrıca absorbe ettiği ışık enerjisini klorofil pigmentine transfer ederek fotosentetik aktivitenin artmasını sağlar. Bununla

birlikte bitki tarafından absorbe edilen fakat kullanılmayan aşırı ışık enerjisini ortama ısı olarak verir ve böylece hücreyi aşırı ışık enerjisinin verebileceği olası zararlardan korumuş olur (Siefermann-Harms, 1987). Karotenoidler tilakoid zardaki ve ışık toplayıcı komplekslerdeki proteinlerin stabilizasyonunu sağlamada da görev alır (Niyogi ve ark., 2001).

Fenolik bileşikler, en önemli doğal antioksidant gruplarından olup bitkilerin tüm bölümlerinde görülebilen polifenolik komponentlerdir. Bitkisel fenoliklerden en yaygın olanı başta flavonoidler olmak üzere sinamik asit türevleri, kumarinler, tokoferoller ve fenolik asitlerdir (Bilaloğlu ve Harmandar, 1999; Harborne ve Williams, 2000; Merken ve ark., 2001; Shahidi ve Naczki, 1995; Silva ve ark., 2000). Flavonoid bileşikler direkt olarak hidrojen peroksiti temizlemektedir (Gechev ve ark., 2006). Bitki fenoliklerinin antioksidant olarak işlev görmesi redoks özelliklerinden kaynaklanır. Bu nedenle indirgeyici ajan, hidrojen verici, singlet oksijen önleyici ve metal şelasyonu yapıcı olarak etki eder (Packer ve ark., 1999; Summanen ve ark., 2001)

## **2.7. Klorofil a Floresansı**

Fotosentez, stres faktörlerinden en çok etkilenen fizyolojik olayların başında gelir. Bu sebeple fotosentez stresle ilgili yapılan çalışmalarda ilk incelenen fizyolojik olaylar arasındadır. Fotosentez hızının veya aktivitesinin ölçümü ile ilgili birçok teknik olsa da günümüzde kullanılan en etkili yöntem klorofil a floresansıdır (Doğru, 2006).

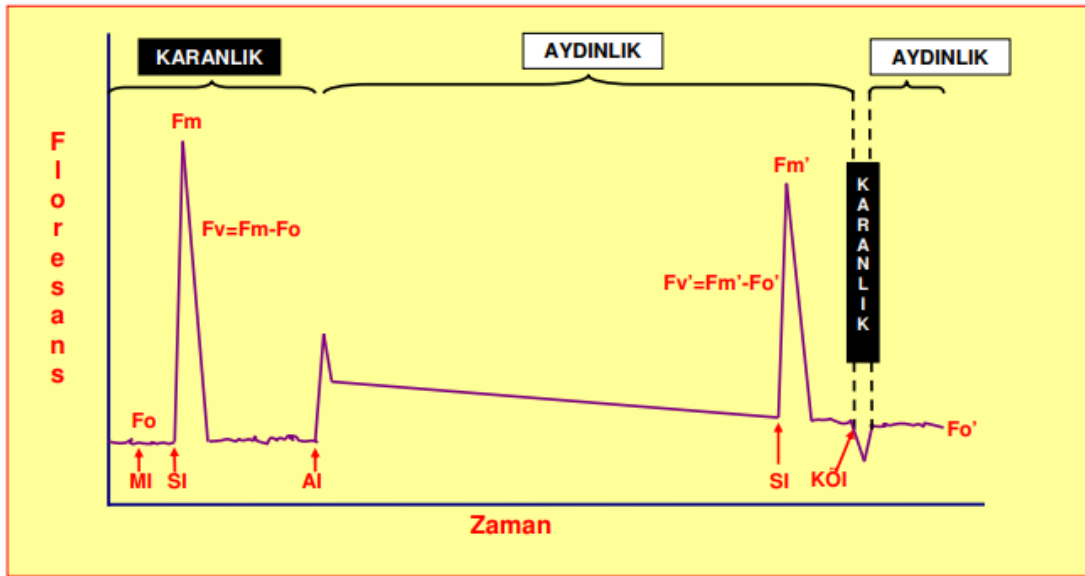
Klorofil a floresans tekniği, stres altındaki bitkilerde fotosentetik etkinliğin ölçülmesinde kullanılan en güvenilir yöntem olup FS II'nin işleyişi hakkında önemli bilgiler vermektedir (Kalaji ve ark., 2011). Bu teknik ile klorofil moleküllerinin absorbe ettiği ışık enerjisinin ne kadarının FS II'ye iletildiği ve yüksek oranlarda iletilen ışık enerjinin FS II üzerinde ne kadar hasara yol açtığı hakkında kolayca fikir edinilir. Özellikle FS II üzerindeki elektron hareketliliği, fotosentezde gerçekleşen tüm olayların hızıyla ilgili belirleyici etkiye sahiptir. Ayrıca FS II, fotosentetik aygıtın en hassas bölgesi olduğundan stres faktörlerinden ilk olarak etkilenen yerdir (Maxwell ve Johnson, 2000). Bu nedenle FS II'nin işleyişi hakkında bilgi edinmek, stres faktörünün fotosentez üzerindeki etkisinin hem kolay hem de hızlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar.

Klorofil a floresans tekniğinin çalışma prensibi ışık enerjisinin takip ettiği yolla ilgilidir. Fotosistemlerde yer alan klorofil moleküllerinin absorbe ettiği ışık enerjisinin

bir kısmı elektron taşıma tepkimelerinin gerçekleşmesinde kullanırken bir kısmı da ortama ışık veya ısı şeklinde tekrar geri döner. Absorbe edilen ışığın daha uzun dalga boyu şeklinde ortama geri verilmesine “floresans” denir. Bu olay, genellikle kloroplasttaki klorofil a molekülü ile yapıldığı için de “klorofil a floresansı” olarak adlandırılır. Klorofillerde absorblanan ışık enerjisinin izlediği üç yol arasında sürekli bir rekabet vardır. Birinin daha etkin olduğu durumda diğer ikisinin etkinliği azalmaktadır. Böylece klorofil a floresansı tekniğiyle, klorofil moleküllerinin floresans verimi ile birlikte ısı şeklinde ortama yayılan enerjinin ve fotokimyasal aktivite seviyesinin hakkında da bilgi edinilmiş olur (Maxwell ve Johnson, 2000). Bu bilgiler, stres faktörünün fotosentetik işleyiş üzerinde ne boyutta etkili olduğu ve bitkinin stresi ne kadar tolere edebildiği ile ilgili yorumların yapılabilmesini sağlar.

Floresans ölçümlerindeki en kritik nokta, FS II üzerindeki ilk elektron alıcısı olan kinon A ( $Q_A$ )’nın redoks durumudur.  $Q_A$ , bir elektronu aldıktan sonra veremezse yeni bir elektron alamaz ve indirgenmiş ( $Q_A^-$ ) halde kalmaya devam eder. Bu durum fotosistemdeki elektron akışını durdurur ve reaksiyon merkezinin kapanmasına neden olur. Reaksiyon merkezinin kapanmasıyla fotosentetik etkinlik azalır; floresans verimliliği ise artar. Sonuç olarak floresans verimliliğinin  $Q_A^-$  yoğunluğuna bağlı olduğu söylenebilir (Govindjee, 2004).

Floresans ölçümlerine başlamadan önce yapraklara klipsler takılarak belirli bir süre karanlık uygulaması yapılır. Bu uygulamanın amacı fotosistemleri elektronlardan tamamen temizlemek ve bileşenlerin hepsini yükseltgenmiş duruma geçirmektir. Sonrasında klipslenmiş bölümlere düşük şiddette modüler ışık uygulanarak minimum floresans ( $F_0$ ); yüksek şiddette modüler ışık uygulanarak maksimum floresans ( $F_m$ ) belirlenir (Şekil 2.7) (Quick ve Horton, 1984).



Şekil 2.7. Modüle edilmiş florometrede floresans sinyalleri (MI, modüle ışık; SI, saturasyon ışık; AI, aktinik ışık; KÖİ, kızıl ötesi ışık) (Maxwell ve Johnson (2000)'den değiştirilerek alınmıştır) (Doğru, 2006).


## 2.8. Arpa (*Hordeum vulgare* L.) Hakkında Genel Bilgiler

Arpa (*Hordeum vulgare* L.) bitkisi, bitkiler aleminin Spermatophyta (tohumlu bitkiler) bölümü içinde, Angiospermea (kapalı tohumlular) alt bölümüne ait, Monocotyledoneae (tek çenekli) sınıfının Poaceae (buğdaygiller) familyasında yer alan tek yıllık otsu bitkilerdendir (Tablo 2.1) (Seçmen ve ark., 2000). Arpanın diploit, tetraploit ve hekzaploit olan türleri vardır. Bunlardan *H. jubotum* tetraploit ( $2n = 28$ ), *H. nodosum* hekzaploit ( $2n = 42$ ) ve kültür arpaları ise diploittir ( $2n = 14$ ). Bununla birlikte kültüre alınan arpaların hepsi tek bir tür, yani *Hordeum vulgare* L. türü olarak kabul edilmektedir (Yürür, 1994).

Arpa dünya üzerinde kültürü yapılan ilk bitkilerden biridir. Pumpelli'n Doğu Türkistan'da yapmış olduğu Anav kazısında M.Ö 5000 yıllarına ait iki sıralı arpa tanelerine rastlandığı bildirilmiştir (Yürür, 1994). Yapılan çalışmalarla, tarımın Yakın Doğu'da Verimli Hilal (Türkiye, İran, Suriye, Filistin ve Ürdün gibi ülkeleri içine alan Mezopotamya adlı coğrafik bölge) olarak adlandırılan bölgede buğday ve arpayla beraber başladığı anlaşılmaktadır (Harlan ve Zohary, 1966). Tarih öncesi devirlerde besin kaynağı olarak kullanılan arpa, zengin nişasta içeriğinin yanında, protein, yüksek sindirilebilir lif ve  $\beta$ -glukan oranlarıyla günümüzde gıda sektörü uygulamalarında oldukça ilgi çekmektedir (Sipahi ve ark., 2010). Arpanın en önemli tüketim alanlarından biri hayvan yemi diğeri ise malt endüstrisidir (Seçkin, 2010). Bunun

yanında arpadan biyoyakıt üretiminde de yararlanılmaktadır (Taşçı ve Bayramoğlu, 2020). Türkiye’de arpa tüketiminin %90’ını hayvan yemi oluştururken; dünyada ise %65’ini hayvan yemi, %33’ünü malt yapımı, %2’sini ise gıda sektörü oluşturmaktadır (Anonim, 2014).

**Tablo 2.1.** *Hordeum vulgare* L. (arpa)’nın sistematığı (Tabloda kullanılan görsel Thome (1885) tarafından hazırlanmıştır.)

<i>Hordeum vulgare</i> L. (arpa)’nın sistematığı	
	Alem : Plantae
	Alt alem : Tracheobionta
	Şube : Spermatophyta
	Alt Şube : Angiospermea
	Sınıf : Monocotyledoneae
	Takım : Poales
	Familya : Poaceae
	Alt familya : Pooideae
	Cins : Hordeum
	Tür : <i>Hordeum vulgare</i> L.

Dünyada buğday, mısır ve pirinçten sonra ekimi yapılan en önemli dördüncü tahıl bitkisidir (Li ve ark., 2007). 2022/23 döneminde dünya genelinde ortalama 47,3 milyon hektar (ha) alanda 151,9 milyon ton arpa üretiminin yapıldığı öngörülmektedir (Tablo 2.2). Dünyada arpa bitkisinin ekim alanlarının ve üretiminin ilk sırasında AB yer almaktadır ve bunu Rusya, Avustralya, Kanada ve Türkiye takip etmektedir. Türkiye genelinde ise arpanın, ortalama 3,2 milyon ha’lık alandaki üretiminin 8,5 milyon ton olduğu ve yaklaşık 266 kg dekar<sup>-1</sup> verime sahip olduğu görülmektedir. 2022 yılında Türkiye’de arpa üretimi bölgesel olarak en fazla %25,4’le Batı Anadolu, %22,4’le Orta Anadolu, %10,3’le Ege ve %8,5’le Güneydoğu Anadolu’da yapılmıştır. Ülkemizde geniş oranda kültürü yapılan bu bitkinin il çapındaki üretimi karşılaştırıldığında ise Konya ve Ankara’nın toplamda %23,4’lük pay ile ilk sıralarda yer aldığı görülmektedir (tablo 2.3) (USDA, 2023; TÜİK, 2023). Arpa 2022 yılında Türkiye’de %47,8 oranıyla üretimi en çok artan tahıl çeşidi olmuştur (TÜİK, 2022).

**Tablo 2.2.** Dünya arpa ekim alanı, üretim ve verim (<sup>1</sup>/Tahmin, <sup>2</sup>/Öngörü) (USDA, 2023).

Yıl	Ekim alanı (bin ha)	Üretim (bin ton)	Verim (ton/ha)
2019/20	52.488	159.296	3,0
2020/21	52.004	161.465	3,1
2021/22	49.815	145.395	2,9
2022/23 <sup>1</sup>	47.303	151.893	3,2
2023/24 <sup>2</sup>	46.508	145.755	3,1

**Tablo 2.3.** Türkiye arpa ekim alanı, üretim ve verim (TÜİK, 2023).

Yıl	Ekim alanı (bin ha)	Üretim (bin ton)	Verim (kg/da)
2018	26.119	7.000	268
2019	28.691	7.600	265
2020	30.972	8.300	268
2021	31.691	5.750	181
2022	31.995	8.500	266

Arpa (*Hordeum spp.*), genetik ve fizyolojik çalışmalarda tercih edilen model bitkilerden biridir (Li ve ark., 2007). Arpanın içeriğinde kuru madde olarak ortalama %52-72 nişasta, %9-14 protein ve nişasta olmayan polisakkaritlerden ise sırayla %4-6 selüloz-lignin, %3-6  $\beta$ -glukan ve %4-7 arabinoksilan yer almaktadır (MacGregor, 1988). Arpada antioksidant olarak görev alan tokotrienol ve tokoferollerin bütün izomerleri ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ve  $\delta$ ) bulunmaktadır (McIntosh ve Russell, 1988). Bunun yanında, arpa B grubu vitaminlerinden özellikle tiamin, pridoksin, riboflavin ve pantotenik asitin kaynağıdır (Thebaudin ve ark., 1997). Ayrıca A ve E vitaminleriyle beraber kalsiyum, potasyum, fosfor gibi mineralleri de içerir (Guo ve ark., 2003).

Ekolojik sınırlılıklarının çok esnek olması arpayı dünya genelinde ekilebilir kılmıştır (Taşçı ve Bayramoğlu, 2020). Arpa tuzluluğa ve kuraklığa olan toleransı ile dünya üzerindeki birçok kurak bölgede yetişebilmektedir. Arpanın en iyi yetiştiği topraklar milli, havalanması ve nemi iyi, organik madde içeriği minimum %5 ve pH'sı nötr topraklardır (Yürür, 1994). Diğer bitki türlerinden daha geniş ekolojik dağılıma sahip olan arpa çok sıcak ve çok soğuk olmayan, oransal nem miktarı fazla olan ortamlarda iyi gelişim gösterir. Arpa için en uygun bölgeler; sıcaklık değerleri 0 °C'nin altına inmeyen ve 18-20 °C'nin üstüne çıkmayan, oransal nem miktarı %70-80 olan bölgelerdir. Buğdayın yetişemediği topraklarda yetişebilme özelliği vardır (Seçkin,

2010). Nemli ve asidik ortamlara duyarlılık göstermekle birlikte kuru, tuzlu, alkali topraklara, soğuk ve kuraklık gibi stres şartlarına diğer tahıllardan daha toleranslıdır (Shakhatreh ve ark., 2010). Al toksisitesine karşı tahıl türleri içerisinde arpanın en duyarlı tür olduğu düşünülmektedir (Mugwira ve ark., 1976; Wang ve ark., 2006b). Arpada Al toleransının genetik ve moleküler haritalama araştırmalarıyla 4H kromozomu üzerinde yer alan tek bir lokus tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir (Wang ve ark., 2006b). Bununla beraber arpa genotiplerinin içinde Al'ye toleranslı varyasyonların da olduğu tespit edilmiştir (Minella ve Sorrells, 1992; Reid ve ark., 1969). Alüminyumun yüksek konsantrasyonları arpa bitkisinde ölüme ya da ürün kaybına yol açabilmektedir (Read ve Oram, 1995).





### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Bitki Materyali

Çalışmada arpanın (*Hordeum vulgare* L.) Çetin-2000 ve Zeynelağa genotiplerine ait tohumlar kullanılmıştır. Arpa genotiplerine ait tohumlar Ankara Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü'nden tedarik edilmiştir.

#### 3.2. Bitkinin Büyüme Koşulları ve Deneysel Plan

Yaklaşık aynı boyutlarda ve sağlam olan arpa tohumları, %5'lik sodyum hipoklorit içinde 10 dakika sterilize edildikten sonra imbibisyon amacıyla 4 saat saf su içinde bekletilmiş ve plastik çimlenme kaplarında 14 ml saf suyla ıslatılmış olan filtre kağıtlarının içerisinde 25 °C ik karanlık iklim odasında çimlenmeye bırakılmıştır. Üç gün sonra çimlenme sonucunda meydana gelen fidelerden yaklaşık aynı boya sahip olanlar, eşit miktarda perlit ve  $\frac{1}{2}$  Hoagland besin çözeltisiyle ( $\frac{1}{2}$  oranında su ilâve edilmiş) hazırlanmış ekim kaplarına geçirilerek, 18/25 °C sıcaklıkta (gündüz/gece), 16/8 saat fotoperiyotta (gündüz/gece), %50±5 oransal nem ve 200  $\mu\text{mol}$  foton  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ışık şiddetindeki iklim odasına alınmıştır. Kaplardaki besin çözeltisi iki günde bir yenilenmiştir. On günlük olan bitkiler stres grubu ve kontrol grubu olarak ikiye ayrılmıştır. Stres grubuna Hoagland besin çözeltisi içinde hazırlanmış olan 3 mM konsantrasyonunda alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$ ) toksisitesi uygulanmış, kontrol grubuna ise  $\frac{1}{2}$  Hoagland besin çözeltisi deneyin sonuna kadar verilmeye devam edilmiştir. Alüminyum toksisitesi uygulamasından beş gün sonra bitkilerde klorofil a floresansı yöntemiyle fotosentetik aktivite saptanmış, bazı fizyolojik büyüme parametreleri ölçülmüş ve biyokimyasal analizler için kullanılacak yaprak numuneleri -20 °C'de muhafaza edilmiştir. Arpa bitkilerinin yetiştirilmesi sırasında kullanılan Hoagland besin çözeltisinin içerdiği bileşenler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.1.** Hoagland besin çözeltisinin içeriği (Hoagland, 1920).

<b><sup>1</sup>/<sub>2</sub> Hoagland Besin Çözeltisi</b>	
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> . 4 H <sub>2</sub> O	
MgSO <sub>4</sub> . 7 H <sub>2</sub> O	50 ml/ 20lt
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> . 3 H <sub>2</sub> O	
KNO <sub>3</sub>	
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> . 18 H <sub>2</sub> O	
KI	
KBr	
SnCl <sub>2</sub> . 2 H <sub>2</sub> O	
LiCl	
MnCl <sub>2</sub> . 4 H <sub>2</sub> O	37.5 ml/ 20 lt
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	
ZnSO <sub>4</sub> . 7 H <sub>2</sub> O	
CuSO <sub>4</sub> . 5 H <sub>2</sub> O	
NiSO <sub>4</sub> . 7 H <sub>2</sub> O	
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> . H <sub>2</sub> O	
FeSO <sub>4</sub> . 7 H <sub>2</sub> O	10 ml/ 20 lt
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	

### 3.3. Bazı Çimlenme ve Fizyolojik Büyüme Parametrelerinin Belirlenmesi

Arpa bitkilerinin kök ve gövde boyları milimetrik cetvel ile beş tekrarlı (n=5) olarak ölçülmüştür. Ölçüm aşamasında en uzun kökün boyu esas alınmış ve sonuçlar cm bitki<sup>-1</sup> şeklinde ifade edilmiştir.

Kontrol ve stres grubundaki arpa bitkilerinin kök ve gövdeleri birleşme yerlerinden bistüri yardımıyla kesilmiştir. Hassas terazi ile kök ve gövdelerin taze (yaş) ağırlıkları ayrı ayrı ölçülmüş; daha sonra 70 °C'ye ayarlanmış etüvde üç gün kurutulmuş ve tekrar hassas terazi ile kuru ağırlıkları tartılmıştır. Kök ve gövdelerin, taze ve kuru ağırlıkları beş tekrarlı (n=5) olarak belirlenmiş; mg bitki<sup>-1</sup> şeklinde belirtilmiştir.

### 3.4. Oransal Su Miktarı

Yapraklardan alınan doku parçaları, taze ağırlıkları (gr) belirlendikten sonra bidistile su içeren kapaklı cam tüplere alınmış ve 24 saat oda sıcaklığında karanlık ortamda bekletilmiştir. Daha sonra her tüpte bulunan yaprak parçalarının yüzeyindeki su, kurutma kağıdıyla uzaklaştırılarak turgorlu ağırlıklar (gr) belirlenmiş ve yaprak parçaları 36 saat boyunca 80 °C'ye ayarlı etüvle kurutulduktan sonra kuru ağırlık (gr)

oranları kaydedilmiştir. Yaprak dokularındaki su miktarının oranı (%) Gibon ve ark. (1997)'ye göre hesaplanmıştır.

### **3.5. Membran Stabilite İndeksi**

0.1 gr ağırlığa sahip yaprak diskleri çeşme ve bidistile su ile yıkandıktan sonra, 10 ml bidistile su içeren cam deney tüplerine alınarak orbital çalkalayıcı (50 rpm) üzerine yerleştirilmiştir. 24 saat sonra her tüpteki sıvıların elektriksel iletkenliği ayrı ayrı ölçülmüştür. Daha sonra tüpler 100 °C'ye ayarlanmış sıcak su banyosunda 10 dakika bekletilmiş ve yine orbital çalkalayıcı (50 rpm) üzerine yerleştirilmiştir. 24 saat sonra her tüpte bulunan sıvıların tekrar elektriksel iletkenlik değeri ölçülmüştür. Yaprak dokularındaki membran stabilite indeksi Sairam ve ark. (1997)'ye göre hesaplanmıştır.

### **3.6. Antosiyanin Miktarı**

Yaprak dokuları, taze ağırlıkları belirlendikten sonra porselen havan içerisinde sıvı azotla öğütülerek eppendorf tüplerine alınmış, üzerine 1.5 ml metil alkol içinde hazırlanmış %1'lik HCl çözeltisi ilâve edilerek 3 gün buzdolabında (4 °C) bekletilmiştir. Tüpler vortekslenerek 10,000 rpm'de 4 °C'de ve 10 dakika santrifüj edildikten sonra süpernatantların absorbansı spektrofotometrik (SHIMADZU UV mini 1240 UV-VIS) olarak 530 ve 657 nm'de ölçülmüştür. Antosiyanin miktarı Mancinelli ve ark. (1975)'e göre hesaplanmıştır.

### **3.7. Fotosentetik pigment miktarı**

Arpa yapraklarından alınan doku parçaları, taze ağırlıklarının tartılmı yapıldıktan sonra içinde 3 ml saf aseton olan kapaklı cam tüplere alınmış ve dokuların yeşil rengi beyazlaşmaya kadar buzdolabında (4 °C) bekletilmiştir. Daha sonra tüpler 5,000 rpm'de ve 4 °C'de 10 dakika süreyle santrifüj edildikten sonra süpernatantların absorbansı spektrofotometrik (SHIMADZU UV mini 1240 UV-VIS) olarak 661.6, 644.8 ve 470 nm'de ölçülmüştür. Yapraklardaki klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve toplam karotenoid miktarı Lichtenthaler (1987)'ye göre hesaplanmıştır.

### **3.8. Dehidrogenaz Aktivitesi (TTC testi; 2, 3, 5-trifenil tetrazolyum klorür testi)**

Yaklaşık 1 mm uzunluğundaki kök uçları bir bistüri yardımıyla kesildikten sonra bidistile su içerisinde yıkanmış ve 10 ml TTC çözeltisine (50 mM NaPO<sub>4</sub> ve %0.25

Tween-20 içinde %0.8'lik TTC, pH 7.4) alınmıştır. Tüpler karanlık ortamda 24 saat boyunca 25 °C'de inkübe edildikten sonra kök uçları çıkarılarak bidistile su ile yıkanmış ve eppendorf tüpleri içinde %95'lik etil alkol içinde ekstrakte edilerek karanlık ortamda 24 saat boyunca 25 °C'de bekletilmiştir. Tüpler 5,000 rpm'de ve 4 °C'de 10 dakikalık santrifüj yapıldıktan sonra oluşan formazonu içeren süpernatantların absorpsiyonu spektrofotometrik olarak 520 nm'de ölçülmüştür (Towill ve Mazur, 1975).

### **3.9. Evan's Blue Testi**

Yaklaşık 1 mm uzunluğundaki kök uçları bir bistüri yardımıyla kesildikten sonra bidistile su içerisinde yıkanmış ve %0.25'lik Evan's blue çözeltisi içine alınarak 20 dakika bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda kök uçları ortamda mavi renk oluşumuna neden olmayıncaya kadar bidistile su ile yıkanmış ve eppendorf tüplerine alınmıştır. Tüplere dimetilformamid çözeltisi ilâve edilerek ekstrakte edilmiş, 5,000 rpm'de ve 4 °C'de 10 dakikalık santrifüj edildikten sonra süpernatantın absorpsiyonu spektrofotometrik olarak 600 nm'de ölçülmüştür (Widholm, 1972).

### **3.10. Klorofil a Floresansı Ölçümleri**

Arpa bitkilerinin yapraklarında bitki verimlilik analizatörüyle (HandyPEA florometresi Hansatech Instruments Ltd., Pentney, King's Lynn, Norfolk, England) klorofil a floresans ölçümleri yapılmıştır. Bunun için ölçümde kullanılacak yapraklara, yaprak klipsleri takılarak 45-60 dk. karanlık adaptasyonu uygulanmıştır. Sonrasında yaprakların yüzeyine  $3,500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ışık şiddeti uygulanmış ve açığa çıkan veriler PeaPlus ve Biolyzer programları ile uygulanan JIP testiyle analiz edilmiştir (Bussotti ve ark., 2007). Klorofil a floresansı ile JIP testinde yer alan bazı parametreler Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

### **3.11. İstatistiksel Analizler**

Denenceler sonucunda elde edilen veriler SPSS paket programı kullanılarak istatistiksel varyans analizi (ANOVA) ile incelenmiştir. Uygulama ve çeşitler arasındaki farkın önemi her bir bağımsız değişken için Duncan testi ile %5 düzeyinde değerlendirilmiştir.

**Tablo 3. 2.** Klorofil a floresansı ölçümlerine bağlı olarak ölçülen ve hesaplanan JIP testi parametreleri (Doğru, 2019).

Parametreler	
<b>F<sub>o</sub></b>	“Karanlık adaptasyonu sağlanmış örnekte tüm FS II reaksiyon merkezlerinin açık olduğu andaki minimum floresans”
<b>F<sub>m</sub></b>	“Karanlık adaptasyonu sağlanmış örnekte tüm FS II reaksiyon merkezlerinin kapalı olduğu andaki maksimum floresans”
<b>F<sub>v</sub></b>	“Fotokimyasal olmayan tüm prosesler minimum seviyede iken maksimum değişken floresans”
<b>F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub></b>	“FS II'nin maksimum kuantum etkinliği”
<b>F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub></b>	“Hill reaksiyonu (fotoliz) etkinliği”
<b>ABS/RC</b>	“Reaksiyon merkezi başına FS II'nin ortalama anten boyutu”
<b>ET<sub>o</sub>/RC</b>	“FS II'de reaksiyon merkezi başına QA'dan sonraki basamaklardaki maksimum elektron taşınımı”
<b>TR<sub>o</sub>/RC</b>	“FS II'de reaksiyon merkezi başına yakalanan ve QA'nın indirgenmesini sağlayan maksimum enerji”
<b>DI<sub>o</sub>/RC</b>	“FS II'de reaksiyon merkezi başına fotokimyasal olaylar dışında kaybedilen dissipasyon enerjisi”
<b>RC/ABS</b>	“FS II'deki anten klorofilleri başına aktif reaksiyon merkezi miktarı”
<b>Alan</b>	“OJIP eğrisinin üzerinde kalan, F <sub>o</sub> ile F <sub>m</sub> arasında bulunan ve indirgenmiş plastokinon (PQ) havuzunun boyutunu ifade eden bölge”
<b>tF<sub>m</sub></b>	“F <sub>m</sub> 'ye ulaşılması için gereken zaman”
<b>ΔV/Δt<sub>o</sub></b>	“Kapalı (indirgenmiş) reaksiyon merkezlerinin birikim hızı”
<b>N</b>	“F <sub>m</sub> 'ye ulaşılıncaya kadar geçen sürede QA'nın indirgenme sayısı”
<b>PI<sub>ABS</sub></b>	Performans indeksi”
<b>SFI<sub>ABS</sub></b>	“FS II'nin yapısal ve fonksiyonel durumunun indikatörü”
<b>SM</b>	“Tüm reaksiyon merkezlerinin indirgenmesi için gereken enerji”
<b>Ψ<sub>o</sub></b>	“Yakalanan bir eksitonun bir elektronu QA'dan elektron taşınım sistemine hareket ettirme etkinliği”
<b>φD<sub>o</sub></b>	“Termal dissipasyonun kuantum verimi”
<b>φE<sub>o</sub></b>	“QA'dan PQ'ya elektron taşınımının kuantum verimi”
<b>φP<sub>o</sub></b>	“Primer fotokimyasal olayların maksimum kuantum verimi”
<b>φ<sub>o</sub>/(1-φ<sub>o</sub>)</b>	“Işığa bağımlı olan fotokimyasal reaksiyonların performans göstergesi”
<b>Ψ<sub>o</sub>/(1-Ψ<sub>o</sub>)</b>	“Işığa bağımlı olmayan karanlık reaksiyonların performans göstergesi”



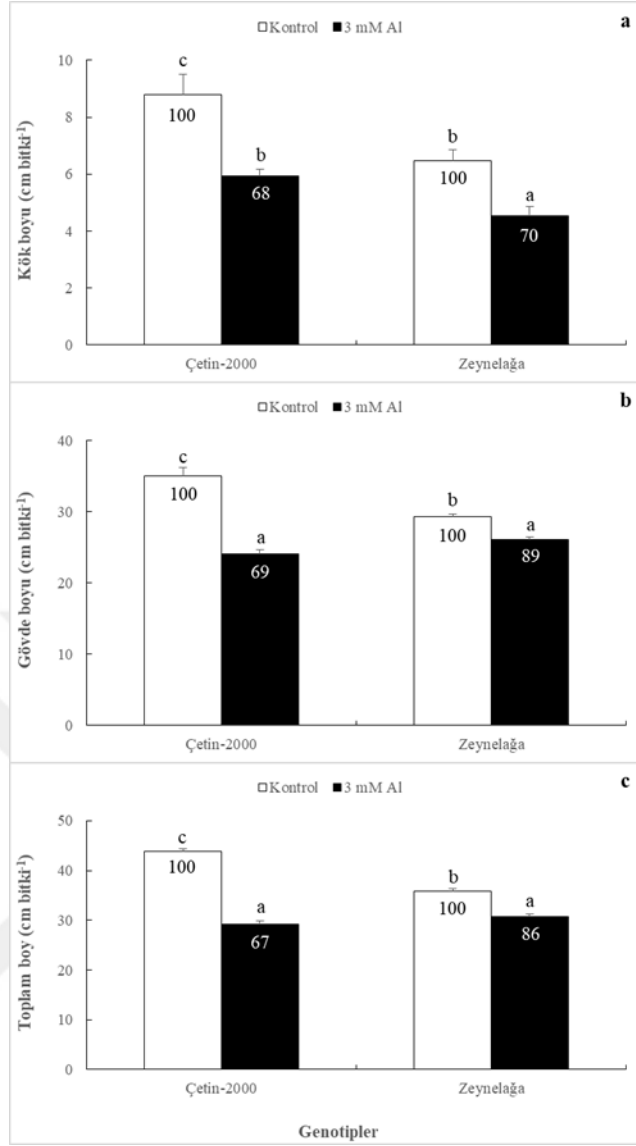
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Alüminyum Uygulamasının Kök Boyu, Gövde Boyu ve Toplam Boy Üzerine Etkisi

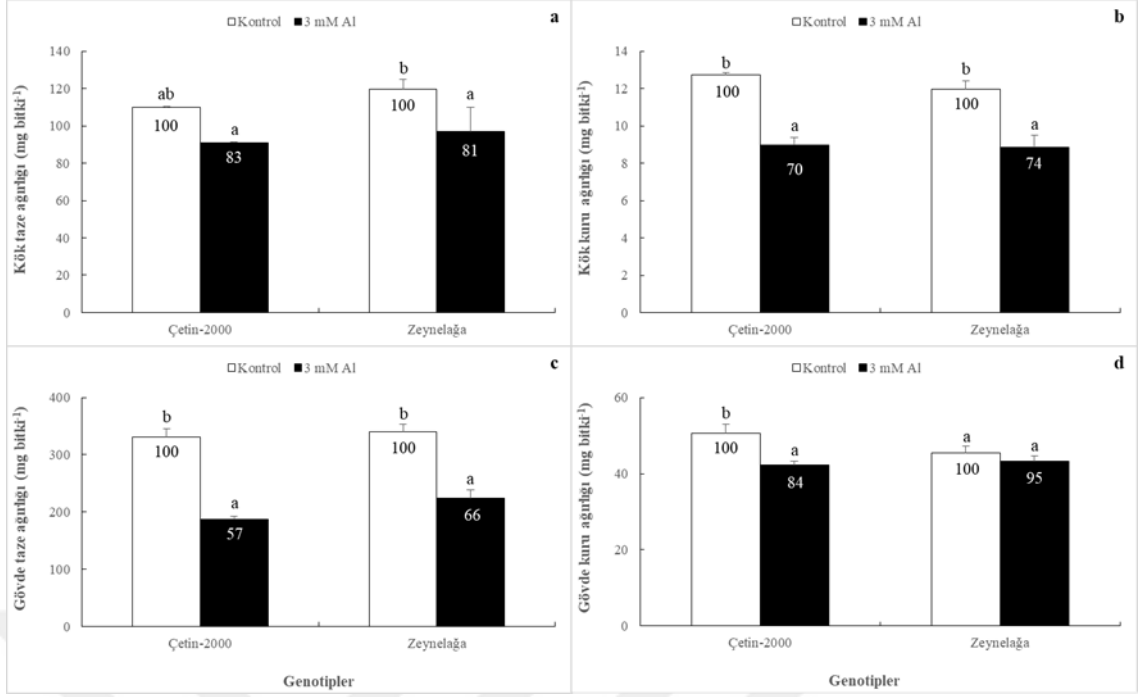
Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ; 3 mM) uygulanan arpa bitkisine ait Çetin-2000 ve Zeynelağa genotiplerinde kök boyu, gövde boyu ve toplam boy parametrelerinde meydana gelen değişimler Şekil 4.1'de görülmektedir. Al uygulaması Çetin-2000 genotipinde kök boyunun %32, Zeynelağa genotipinde ise %30 oranında azalmasına neden olmuştur. Bu değişimler ilgili kontrollere göre istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Şekil 4.1a) ( $P < 0.05$ ). Al uygulaması kök boyunun Zeynelağa genotipinde, Çetin-2000 genotipi ile karşılaştırıldığında daha fazla inhibe olmasına sebep olmuştur ( $P < 0.05$ ). Benzer şekilde, Al uygulaması sonucunda gövde büyümesi Çetin-2000 genotipinde kontrole göre %31, Zeynelağa genotipinde ise %11 oranında ve kontrollere göre önemli derecede inhibe edilmiştir (Şekil 4.1b) ( $P < 0.05$ ). Al uygulaması toplam boyun Çetin-2000 genotipinde kontrole göre %33, Zeynelağa genotipinde ise %14 oranında ve belirgin bir şekilde azalmaya neden olmuştur (Şekil 4.1c) ( $P < 0.05$ ).

### 4.2. Alüminyum Uygulamasının Kök ve Gövdenin Taze ve Kuru Ağırlığı Üzerine Etkisi

Al uygulaması sonucunda Çetin-2000 genotipinde kök taze ağırlığı kontrole göre %17, Zeynelağa genotipinde ise %19 oranında azalmıştır (Şekil 4.2a). Sadece Zeynelağa genotipindeki değişim ilgili kontrole göre önemli bulunmuştur ( $P < 0.05$ ). Kök kuru ağırlığı ise Çetin-2000 ve Zeynelağa genotipinde Al uygulaması sonucu kontrolleriyle kıyaslandığında sırayla %30 ve %26 seviyelerinde ve belirgin derecede azalma göstermiştir (Şekil 4.2b) ( $P < 0.05$ ). Gövde taze ağırlığı Al uygulaması ile Çetin-2000 genotipinde kontrole göre %43, Zeynelağa genotipinde ise kontrole göre %34 oranında azalmıştır (Şekil 4.2c). Her iki genotipte gözlenen değişimler istatistiksel açıdan önemli görülmüştür ( $P < 0.05$ ). Al uygulaması Çetin-2000 genotipinde gövde kuru ağırlığının kontrole göre %16 ( $P > 0.05$ ), Zeynelağa genotipinde ise %5 seviyesinde azalmaya yol açmıştır. (Şekil 4.2d) ( $P < 0.05$ ).



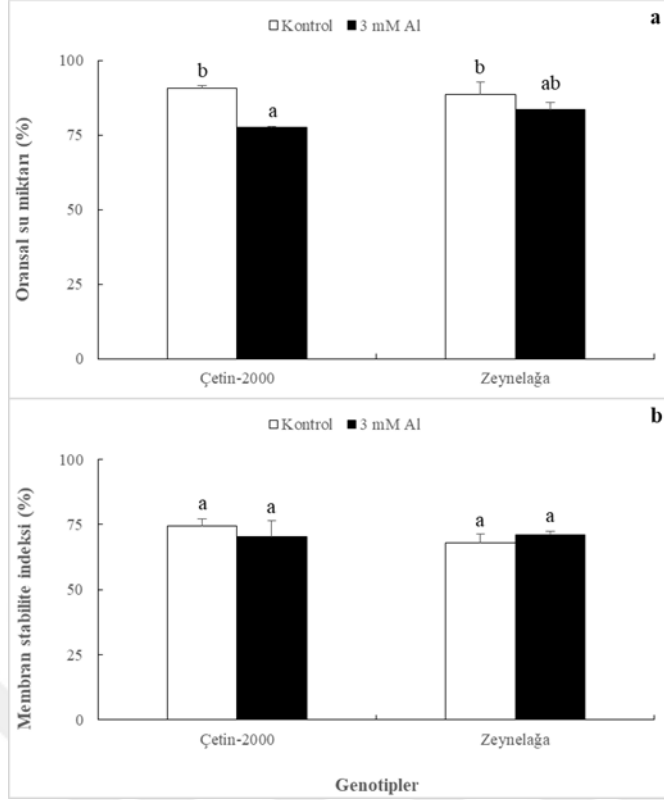
**Şekil 4.1.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinde (a) kök boyu, (b) gövde boyu ve (c) toplam boy üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler beş tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)].



**Şekil 4.2.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinde (a) kök taze ağırlığı, (b) kök kuru ağırlığı, (c) gövde taze ağırlığı ve (d) gövde kuru ağırlığı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler beş tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)].

#### 4.3. Alüminyum Uygulamasının Yaprak Dokularındaki Oransal Su Miktarı ve Membran Stabilite İndeksi Üzerine Etkisi

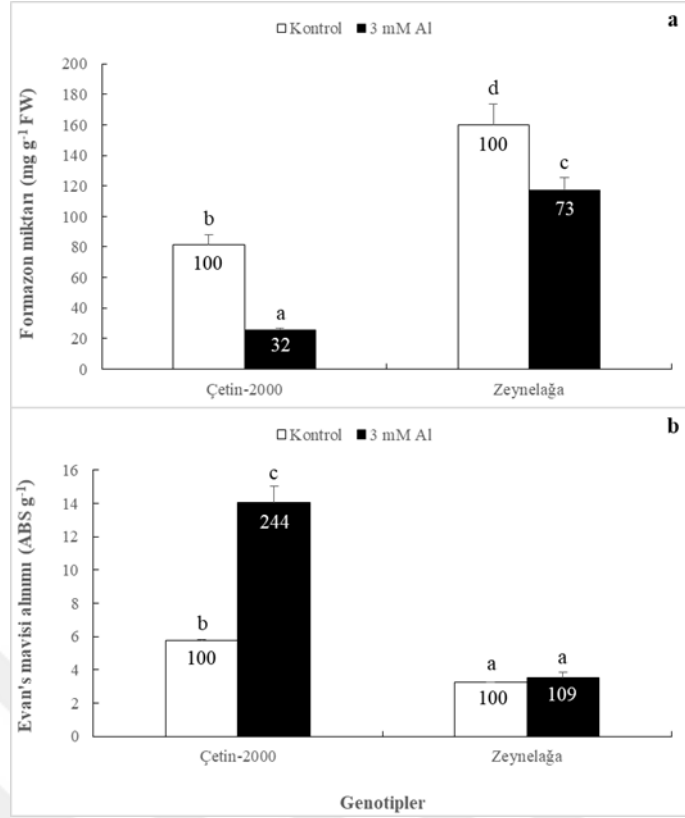
Al uygulaması Çetin-2000 genotipinde yapraklardaki oransal su miktarını kontrole kıyasla önemli oranlarda azalmalara neden olurken (Şekil 4.3a) ( $P < 0.05$ ), Zeynelağa genotipinde oransal su miktarını etkilemediği görülmüştür ( $P > 0.05$ ). Membran stabilite indeksinde ise her iki genotipte de Al uygulamaları sonucunda kendi kontrollerine göre istatistiksel açıdan önemli bir değişim tespit edilmemiştir (Şekil 4.3b) ( $P > 0.05$ ).



**Şekil 4.3.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinde (a) oransal su miktarı ve (b) membran stabilite indeksi üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler üç tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)].

#### 4.4. Alüminyum Uygulamasının Köklerdeki Formazon Miktarı ve Evan's Mavisi Alınımı Üzerine Etkisi

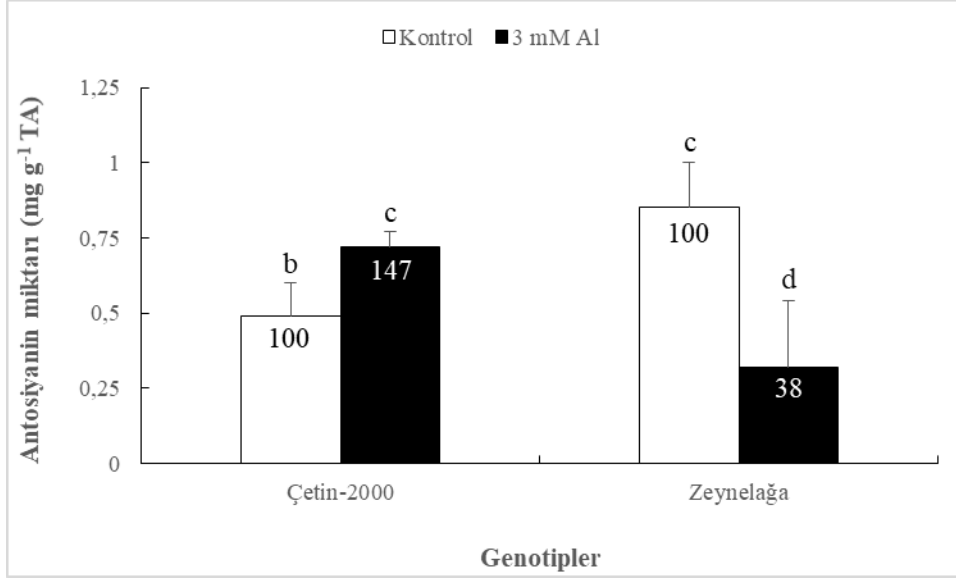
Al uygulaması Çetin-2000 genotipinde köklerdeki formazon miktarını kontrole göre %68, Zeynelağa genotipinde ise kontrole göre %27 seviyesinde ve önemli oranlarda düşürmüştür (Şekil 4.4a) ( $P < 0.05$ ). Köklerdeki formazon miktarı Zeynelağa genotipi ile karşılaştırıldığında Çetin-2000 genotipinde daha belirgin derecede azalmıştır. Çetin-2000 genotipinin köklerdeki Evan's mavisi boyasının alınım hızı Al uygulaması etkisiyle kontrole göre %144 seviyesinde ve önemli oranlarda artarken (Şekil 4.4b) ( $P < 0.05$ ), Zeynelağa genotipinde istatistiksel bakımdan belirgin bir değişim görülmemiştir ( $P > 0.05$ ).



**Şekil 4.4.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin köklerinde (a) formazon miktarı ve (b) Evan's mavisı alımı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler üç tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)].

#### 4.5. Alüminyum Uygulamasının Yapraklardaki Antosiyanin Miktarı Üzerine Etkisi

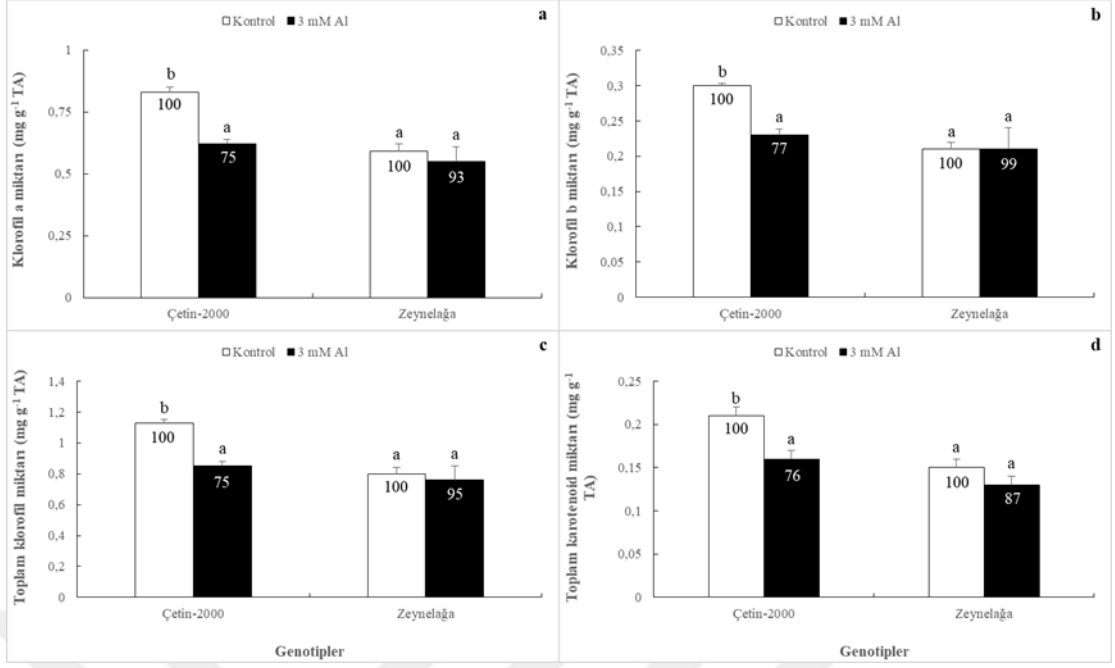
Al uygulaması Çetin-2000 genotipinde yapraklardaki antosiyanin miktarının kontrole göre %47 oranında artmasına, Zeynelağa genotipinde ise kontrole göre %62 oranında azalmasına yol açmıştır (Şekil 4.5). Her iki genotipte yapraklardaki antosiyanin miktarında Al etkisiyle meydana gelen değişim kontrol gruplarıyla kıyaslandığında önemli bulunmuştur ( $P < 0.05$ ).



**Şekil 4.5.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki antosiyanin miktarı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler üç tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)].

#### 4.6. Alüminyum Uygulamasının Yapraklardaki Fotosentetik Pigment Miktarı Üzerine Etkisi

Al uygulaması sonucunda Çetin-2000 genotipinin yapraklarındaki klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve toplam karotenoid miktarı kontrolle kıyaslandığında sırayla %25, %23, %25 ve %24 seviyelerinde ve istatistiksel olarak anlamlı derecelerde azalmıştır (Şekil 4.6a, b, c ve d) ( $P < 0.05$ ). Zeynelağa genotipinin yapraklarında ise klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve toplam karotenoid miktarı kontrolle kıyaslandığında sırayla %7, %1, %5 ve %13 seviyelerinde azalmaya neden olmuş; fakat bu değişimler istatistiksel açıdan önemli bulunmamıştır (Şekil 4.6a, b, c ve d) ( $P > 0.05$ ).

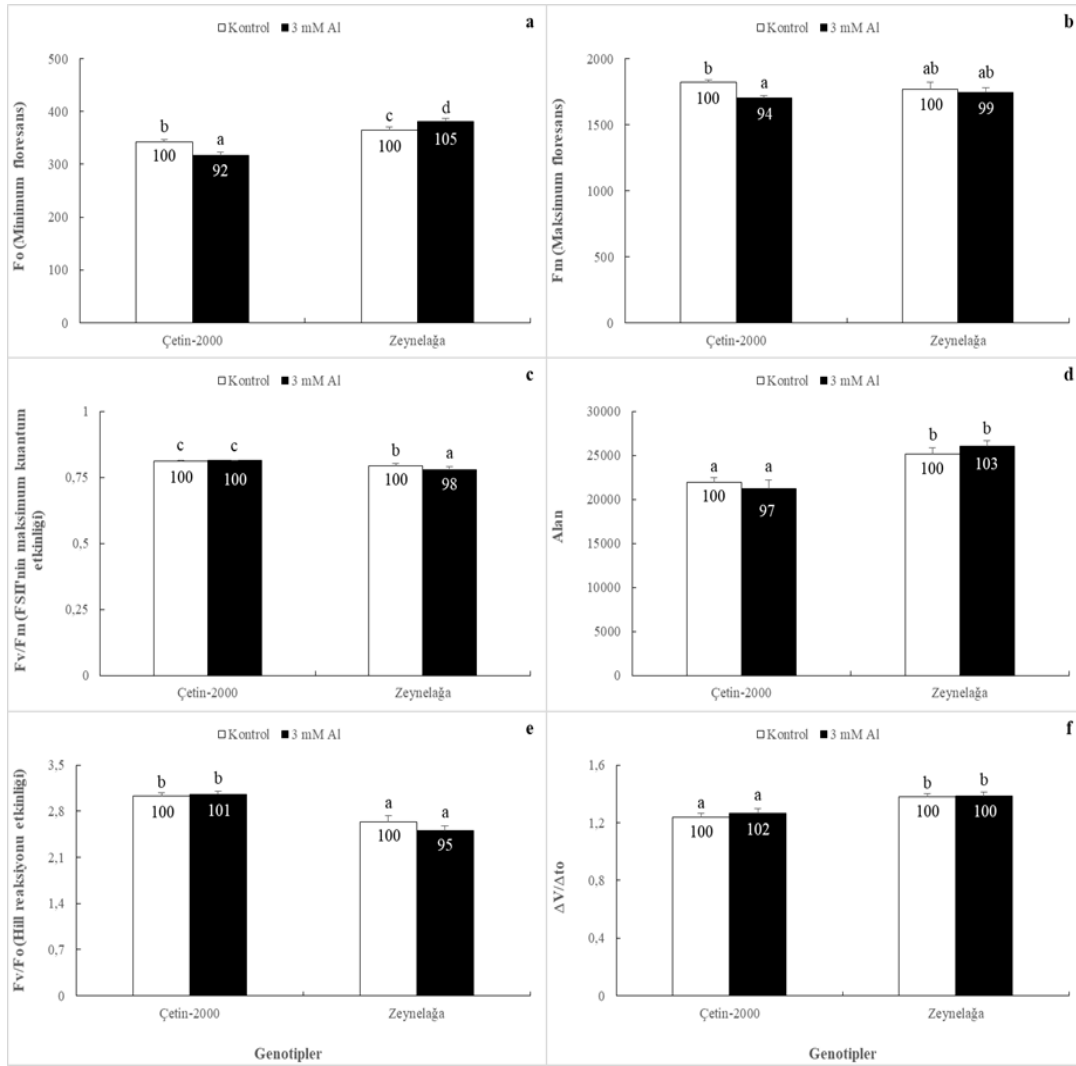


**Şekil 4.6.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki (a) klorofil a, (b) klorofil b, (c) toplam klorofil ve (d) toplam karotenoid miktarı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler üç tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)].

#### 4.7. Alüminyum Uygulamasının Yapraklardaki Fotosentetik Aktivite Üzerine Etkisi

Al uygulaması sonucu Çetin-2000 genotipinde  $F_o$  (minimum floresans) parametresi kontrole göre %8 oranında azalırken; Zeynelağa genotipinde %5 oranında artmıştır (Şekil 4.7a). Bu değişimler istatistiksel açıdan anlamlı görülmüştür ( $P < 0.05$ ). Al uygulanan Çetin-2000 genotipinde  $F_m$  (maksimum floresans) parametresi kontrolle karşılaştırıldığında %6 oranında ve önemli derecede azalırken (Şekil 4.7b) ( $P < 0.05$ ); Zeynelağa genotipinde kontrole göre %1 oranında azalmış ancak istatistiksel olarak etkilenmemiştir ( $P > 0.05$ ). Al uygulaması Çetin-2000 genotipinde  $F_v/F_m$  (FS II'nin maksimum kuantum etkinliği) parametresini kontrolle karşılaştırıldığında etkilenmemiş (Şekil 4.7c) ( $P > 0.05$ ), Zeynelağa genotipinde ise kontrolüne göre %2 oranında ve istatistiksel olarak anlamlı bulunan bir azalmaya neden olmuştur ( $P < 0.05$ ). Alan,  $F_v/F_o$  (Hill reaksiyonu etkinliği) ve  $\Delta V/\Delta t_o$  (kapalı reaksiyon merkezlerinin birikim hızı) parametrelerinde ise Al uygulaması sonucunda her iki genotipte de ilgili kontrollere göre önemli bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 4.7d, e ve f) ( $P > 0.05$ ). Ancak Al uygulaması alan ve  $\Delta V/\Delta t_o$  parametrelerinin Çetin-2000 genotipine göre

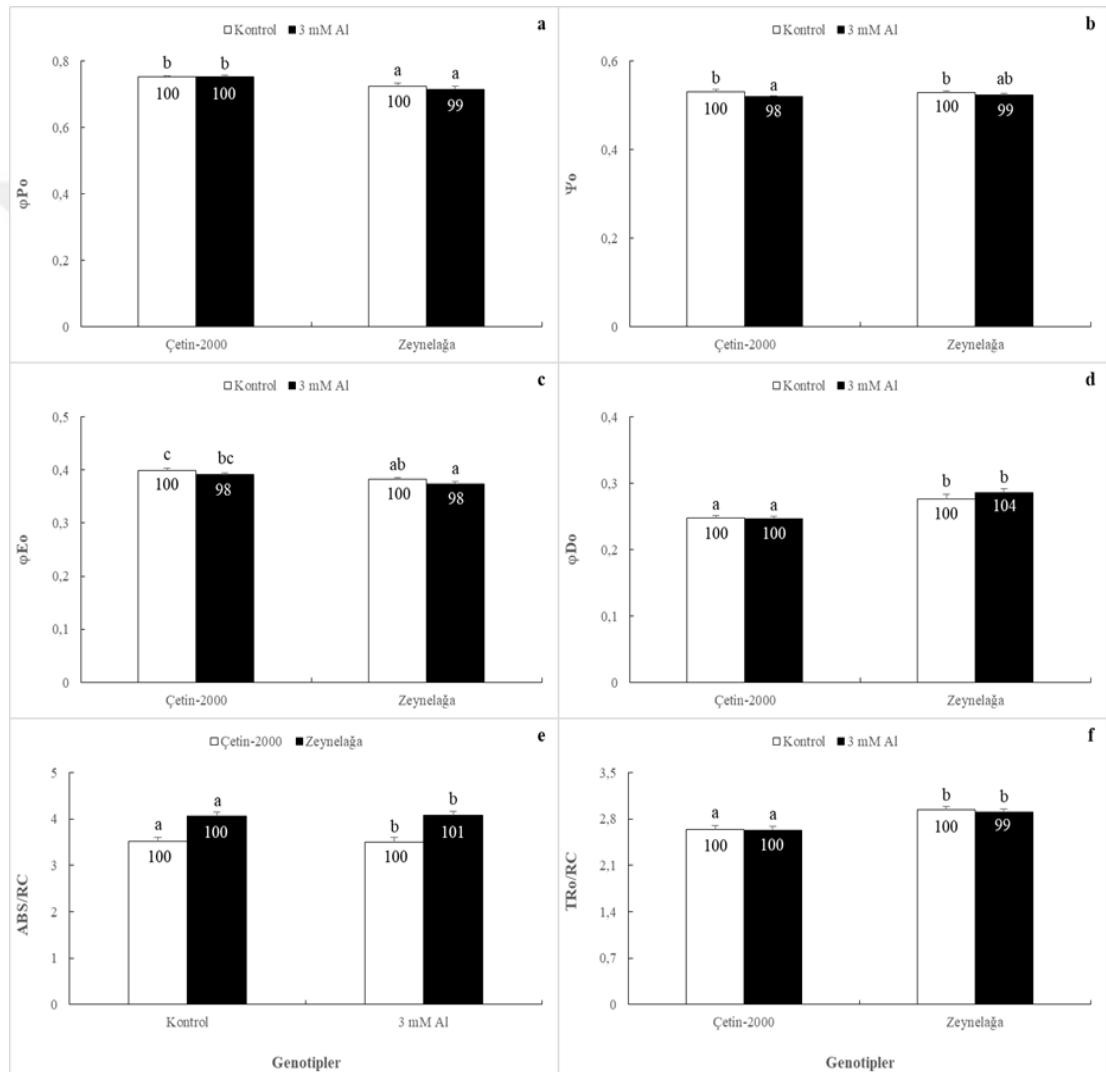
Zeynelağa genotipinde daha belirgin derecede artmasına; Fv/Fo parametresinde ise daha belirgin şekilde azalmasına neden olmuştur ( $P < 0.05$ ).



**Şekil 4.7.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki (a) Fo, (b) Fm, (c) Fv/Fm, (d) alan, (e) Fv/Fo ve (f)  $\Delta V/\Delta t_0$  miktarı üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler on tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)].

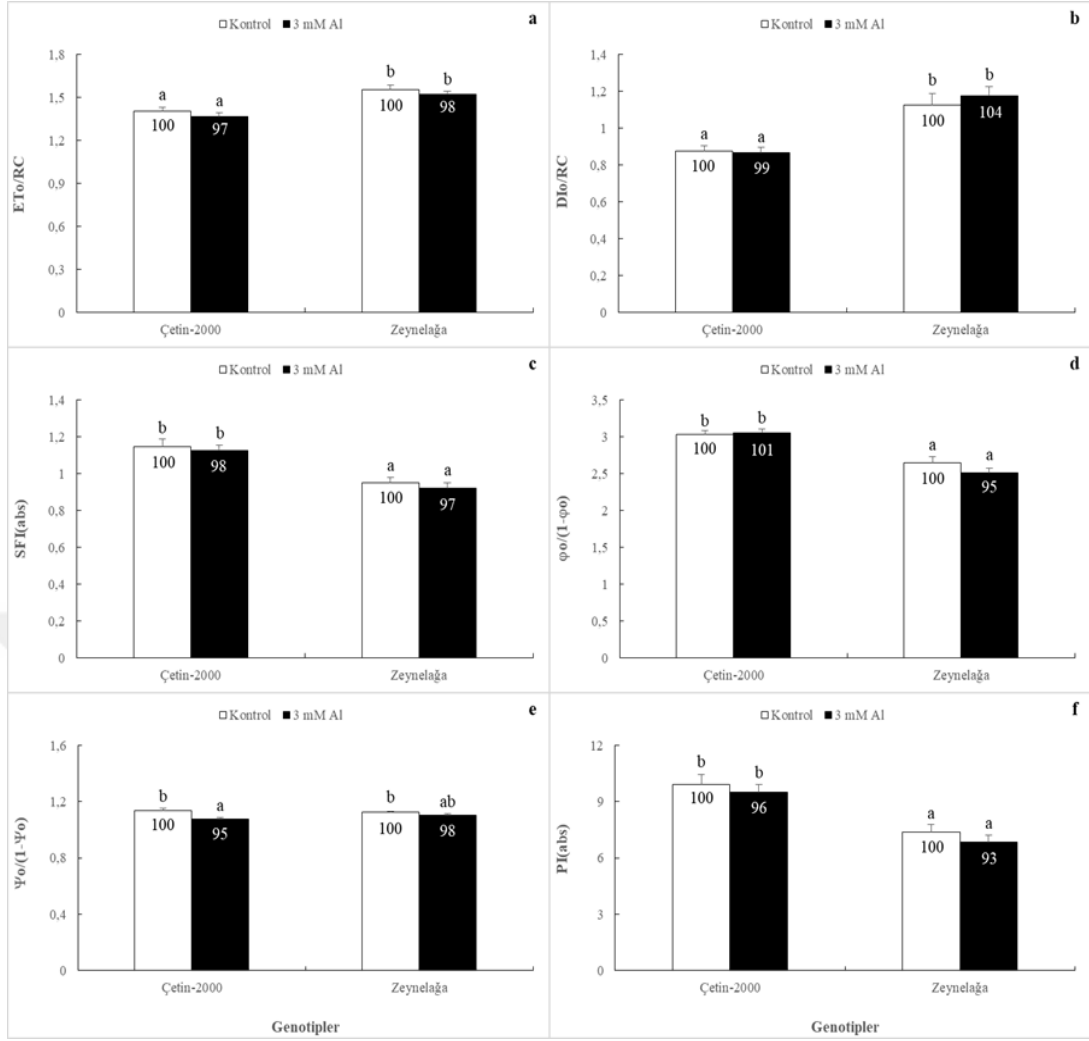
Arpalara uygulanan Al her iki genotipte de  $\phi Po$  (primer fotokimyasal olayların maksimum kuantum verimi),  $\phi Eo$  ( $Q_A$ 'dan plastokinona elektron taşınımının kuantum verimi),  $\phi Do$  (termal dissipasyonun kuantum verimi), ABS/RC (FS II anten klorofilleri için reaksiyon merkezi başına ışık absorpsiyonu akışı) ve TRo/RC (tepkime merkezi başına yakalanan ve  $Q_A$ 'nın indirgenmesini sağlayan maksimum enerji akışı) parametrelerinde ilgili kontrollere göre istatistiksel anlamda bir değişime

neden olmamıştır (Şekil 4.8a, c, d, e ve f) ( $P>0.05$ ). Ancak genotipler kendi arasında kıyaslandığında  $\phi P_o$  ve  $\phi E_o$  parametreleri Al uygulanan Zeynelağa genotipinde Çetin-2000 genotipine göre daha barız bir şekilde azalırken ( $P<0.05$ );  $\phi D_o$ , ABS/RC ve TRo/RC artmıştır ( $P<0.05$ ).  $\Psi_o$  (yakalanan bir ekzitonun bir elektronu  $Q_A$ 'dan elektron taşınım sistemine gönderme etkinliği) Al uygulaması sonucunda Çetin-2000 genotipinde kontrol grubuna göre %2 seviyesinde önemli oranda azalma gösterirken (Şekil 4.8b) ( $P<0.05$ ); Zeynelağa genotipinde etkilenmemiştir ( $P>0.05$ ).

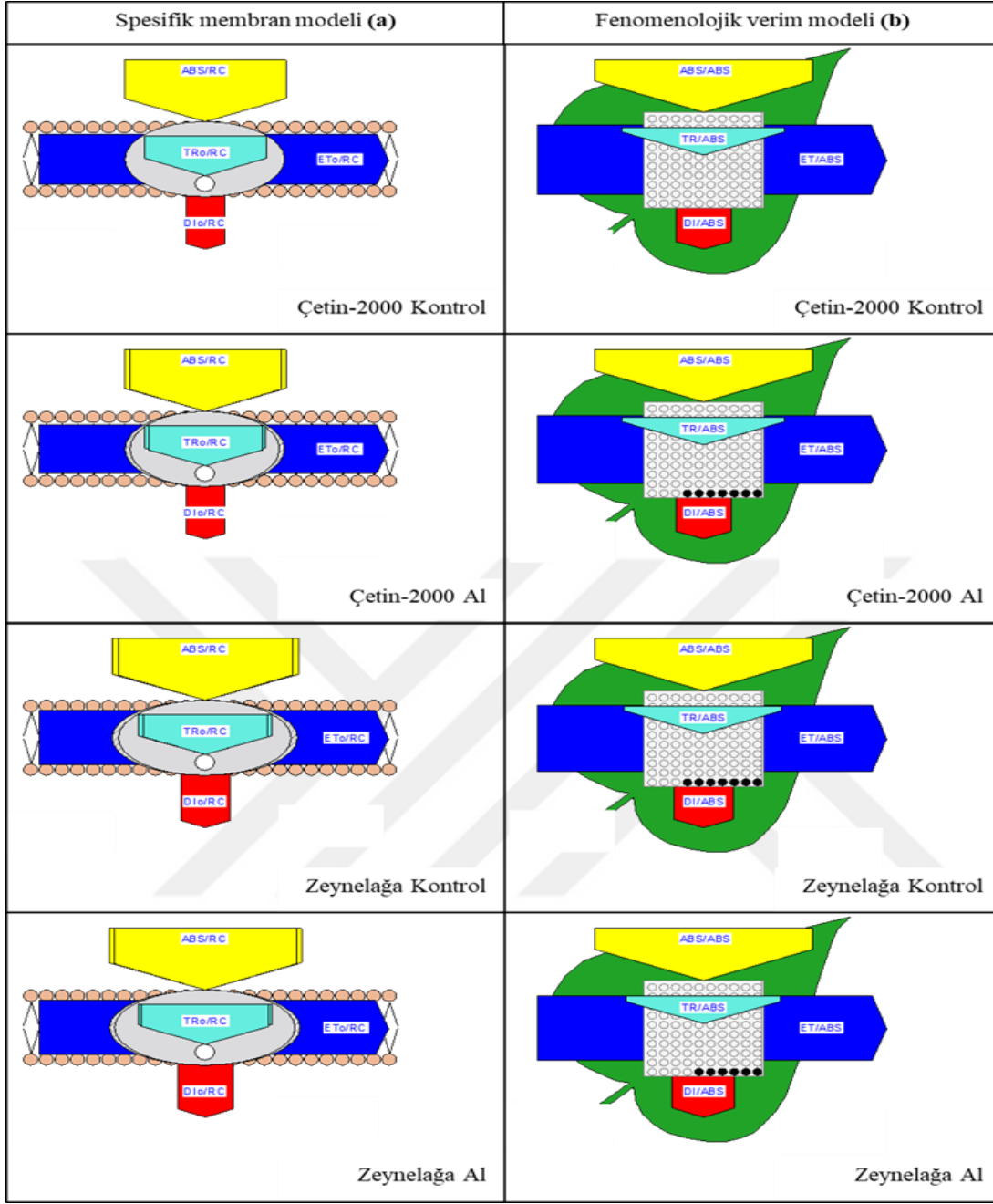


**Şekil 4.8.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki (a)  $\phi P_o$ , (b)  $\Psi_o$ , (c)  $\phi E_o$ , (d)  $\phi D_o$ , (e) ABS/RC ve (f) TRo/RC üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir.) (Değerler on tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)]

Al uygulaması Çetin-2000 ve Zeynelağa genotiplerinde ETo/RC (FS II'deki rekasyon merkezi başına  $Q_A$ 'dan sonraki bölgede maksimum elektron taşınım akışı), DIo/RC (FS II'deki tepkime merkezi başına dissipasyon enerjisi akışı), SFI(abs) (FS II'nin yapısal ve fonksiyonel durumunun indikatörü),  $\phi_o/(1-\phi_o)$  (primer fotokimyasal olaylar için konformasyon terimi) ve PI(abs) (performans indeksi) parametrelerini ilgili kontrollerle karşılaştırıldığında istatistiksel anlamda etkilememiş (Şekil 4.9a, b, c, d ve f) ( $P>0.05$ ). Ancak ETo/RC ve DIo/RC parametreleri Al uygulanan Zeynelağa genotipinde, Çetin-2000 ile karşılaştırıldığında istatistiksel olarak daha belirgin şekilde artarken; SFI(abs),  $\phi_o/(1-\phi_o)$  ve PI(abs) parametreleri önemli derecede azalmıştır ( $P<0.05$ ).  $\Psi_o/(1-\Psi_o)$  (termal reaksiyonlar için konformasyon terimi), Al uygulanan Çetin-2000 genotipinde kontrole göre %5 oranında ve önemli derecede azalırken (Şekil 4.9e) ( $P<0.05$ ), Zeynelağa genotipinde önemli bir değişim görülmemiştir ( $P>0.05$ ).

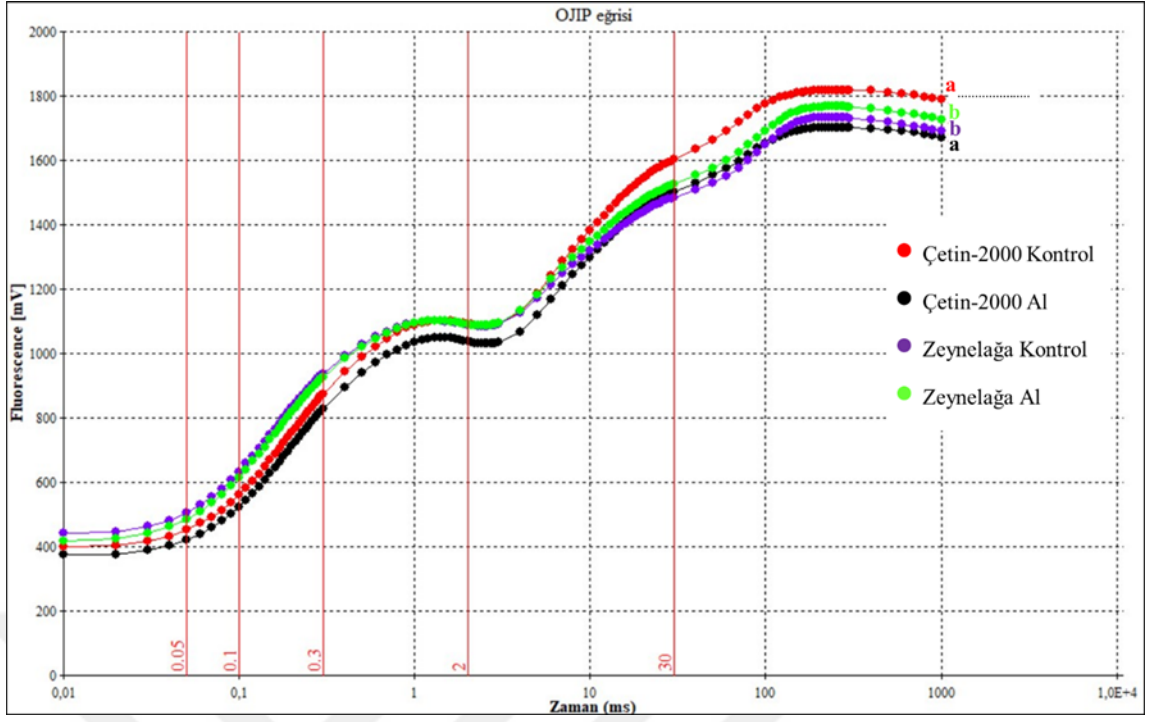


**Şekil 4.9.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulamasının farklı arpa genotiplerinin yapraklarındaki (a) ETo/RC, (b) DIo/RC, (c) SFI(abs), (d)  $\phi_o/(1-\phi_o)$ , (e)  $\Psi_o/(1-\Psi_o)$  ve (f) PI(abs) üzerindeki etkisi [(Harflerin farklı olması kontrol gruplarına göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir) (Değerler on tekrarın ortalaması olup barlar  $\pm$  standart hata değerlerini belirtmektedir)].



**Şekil 4.10.** Alüminyum ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , 3 mM) uygulanan iki farklı arpa genotipinde bazı JIP testi parametrelerinin (a) spesifik membran modeli ve (b) fenomenolojik verim modeline göre gösterimi. Fenomenolojik verim modelindeki (b) boş daireler sağlam reaksiyon merkezlerini, koyu renkli daireler ise hasar görmüş reaksiyon merkezlerini göstermektedir.

Alan parametresi Al uygulaması sonucunda Çetin-2000 genotipinde kontrole göre %3 oranında azalırken, Zeynelağa genotipinde %3 oranında artmış; ancak bu değişimler istatistiksel olarak önemli görülmemiştir (Şekil 4.11) ( $P > 0.05$ ).



**Şekil 4.11.** Alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{S}_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , 3 mM) uygulanan iki farklı arpa genotipinde klorofil a floresansı indüksiyon (OJIP) eğrisi [(Farklı harfler kontrollere göre farkın anlamlı ( $P < 0.05$ ) olduğunu ifade etmektedir) (Değerler on tekrarın ortalamasıdır)].



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya genelindeki asitli toprak miktarı düşünüldüğünde tarım arazilerindeki bitkisel verimi ve kaliteyi artırmak için alüminyuma dirençli, tolerans mekanizması güçlü olan bitkilerin tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bitkilerin Al toksisitesine karşı göstermiş olduğu tepkiler, tolerans düzeylerine bağlı olarak gerçekleşir. Yapılan çalışmada, ülkemizde tarımı yapılan Çetin-2000 ve Zeynelağa adlı iki arpa genotipi üzerinde Al toksitesinin (3 mM  $Al_2O_3 \cdot 1.5H_2O$ ) neden olduğu fizyolojik, biyokimyasal ve fotokimyasal değişimler araştırılmıştır.

Yapılan çalışmada, fide evresinde beş gün boyunca Al toksisitesine maruz bırakılmış arpa genotiplerinin; kontrollerine kıyasla kök, gövde ve toplam boylarının önemli derecede inhibe edildiği görülmüştür. Al'nin kök boyu üzerindeki etkisi her iki genotip için benzerdir. Ancak gövde uzunlukları arasındaki farklılık incelendiğinde özellikle Çetin-2000 genotipinin Al toksisitesinden Zeynelağa genotipine göre daha fazla etkilendiği görülmektedir. Buna göre her iki genotipte kök büyümesinin Al toksisitesine yaklaşık olarak aynı derecede duyarlı olduğu; gövde büyümesi bakımından ise Çetin-2000 genotipinin daha duyarlı, Zeynelağa genotipinin daha dayanıklı olduğu söylenebilir.

Yapılan diğer araştırmalar da elde ettiğimiz bulguları destekler niteliktedir. Tamás ve ark. (2004); yapmış oldukları çalışmada arpa bitkisine 2, 4, 6 ve 8 mM'lık alüminyumu 48 saat boyunca uygulamış ve giderek artan Al konsantrasyonları karşısında kök büyümesinin sırasıyla %90, %80, %57 ve %38 oranında inhibe olduğunu rapor etmişlerdir. Araştırmacılar sonuç olarak artan konsantrasyonlardaki alüminyumun kök hücre zarı bütünlüğünü bozduğunu ve kök büyümesini inhibe ettiğini bildirmişlerdir. Benzer şekilde, yapılan başka bir çalışmada arpa bitkisinin Çetin-2000 genotipine 20  $\mu$ M alüminyum uygulanmış ve bu uygulama sonucu kök büyüme hızında önemli azalmalar saptanmıştır. Araştırmacılar Al uygulamasının kök hücrelerinde ciddi tahribatlar oluşturduğunu, kök hücrelerinde plazma zarı bütünlüğünü bozduğunu, mitoz bölünme hızını ve protein miktarını azalttığını, peroksidaz ve süperoksit dismutaz gibi antioksidant enzim aktivitelerini artırdığını ve DNA fragmentasyonlarına yol açtığını bildirmiştir (Yalçın, 2016). Šimonovičová ve ark.

(2004), arpa bitkisiyle yaptıkları çalışmada kök büyümesinde gözlenen inhibisyonu; Al'nin plazma zarının bütünlüğünü bozmasına ve bundan kaynaklı hücre ölümlerine bağlamışlardır.

Buna göre çalışmada kök büyümesinin inhibisyonu, Al'nin kök uçlarında ciddi tahribatlara yol açtığı bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Yapılan literatür taraması sonucu Al iyonlarının özellikle kök büyümesini inhibe ettiğini göstermesi çalışmamızı destekler niteliktedir. Al'nin özellikle kök büyümesini inhibe etmesinin sebebi bitkide en çok birikim gösterdiği yerin kök olmasından kaynaklı olabilir. Yapılan çalışmalar Al'nin özellikle kök korteksinde yer alan epidermis ve parankima hücreleri tarafından alındığını göstermiştir (Vardar ve ark., 2011). Büyüme ve gelişmeyi engelleyen diğer bir neden Al'nin köklerden su alınımını yavaşlatmasıyla bitkinin yetiştirme ortamından yeterince besin elementlerini alamaması olabilir. Nitekim çalışmada Al uygulanan Çetin-2000 genotipinin yapraklarındaki oransal su miktarı azalmıştır. Uysal (2007), buğday bitkisinde Al toksisitesi ile ilgili yaptığı çalışmada büyüme hızı ile kök taze ve kuru ağırlığında meydana gelen azalmayı bitkinin büyüme ortamından yeterince mineral alamamasıyla ilişkilendirmiştir. Yapılan birçok çalışmada Al'nin bitkinin iyonik ortamını değiştirerek besin elementlerinin taşınmasını ve dengesini bozduğu (Bose ve ark., 2011; Jones ve ark., 2006; Zhang ve ark., 2007); bitkide Ca, Mg ve K gibi besin elementlerinin kökten alınımını yavaşlatarak büyüme ve gelişmeyi olumsuz etkilediği bildirilmiştir (Kaval, 2016). Çalışmada kuru ağırlık parametresinde gözlenen değişimler her iki genotipte de köklerdeki biyosentetik kapasitenin Al toksisitesi sonucu daha olumsuz yönde etkilendiğini göstermiştir. Gövde kuru ağırlıklarında Al toksisitesi sonucu meydana gelen değişimler ise Zeynelağa genotipinin daha az etkilendiğini göstermektedir. Bu durum Zeynelağa genotipinde Al toksisitesi ile ilgili çeşitli tolerans mekanizmalarının varlığını gösteriyor olabilir. Nitekim elde ettiğimiz sonuçlar Al uygulanan iki arpa genotiplerinin yaprak dokularındaki membran stabilite indeksinin değişmediğini göstermiştir. Birçok araştırmacı çalışmalarında alüminyumun farklı doz ve sürelerdeki uygulaması ile arpa bitkisinin kök büyümesinin inhibisyonuyla birlikte birçok olumsuz durum tespit etmiştir (Song ve ark. 2011; Tamás ve ark., 2005; Yalçın, 2016). Bunun yanı sıra elde ettiğimiz sonuçlar Çetin-2000 genotipinde Al uygulaması sonucunda formazon birikiminin daha belirgin şekilde azaldığını, Evan's mavisini alınımının da belirgin derecede arttığını göstermiştir. Bu da Çetin-2000 genotipinin kök dokularında

solunum aktivitesinin daha fazla inhibe edildiğini ve canlılık oranının daha olumsuz yönde etkilendiğini ispat etmektedir. Çalışmada Al uygulaması Çetin-2000 genotipinin yapraklarındaki antosiyanin miktarını önemli derecede artırırken, Zeynelağa genotipinde azaltmıştır. Biyotik ve abiyotik stres faktörleri altındaki bitkilerde antioksidant etkiye sahip olan ve stres faktörlerinin tolere edilmesini sağlayarak antosiyanin miktarının arttığı bilinmektedir (Llanes ve ark., 2016). Antosiyaninlerin soğan bitkisinde bakır, pirinç bitkisinde kadmiyum, çay bitkisinde arsenik, kolza bitkisinde ise kadmiyum ve alüminyum toksisitesine karşı koruma sağladığı rapor edilmiştir (Macar ve ark., 2020; Mi ve ark., 2021; Li ve ark., 2020; Sami ve ark., 2020). Çalışmada Al toksisitesi uygulanan Çetin-2000 genotipinde yapraklardaki fotosentetik pigment miktarı kontrolle karşılaştırıldığında belirgin derecede azalmış, Zeynelağa genotipinde etkilenmemiştir. Yapılan bazı çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Cunha Neto ve ark., 2020; Musyimi 2023; Dar ve ark., 2022). Quian ve ark. (2018) bitkilerde Al toksisitesinin hem taze ve kuru ağırlıkta hem de fotosentetik pigment miktarında neden olduğu azalmaların birbiriyle ilişkili olduğunu rapor etmiştir. Bu da elde ettiğimiz sonuçlarla uyumludur. Rampim ve Lana (2013), Al toksisitesi sonucunda reaksiyon merkezlerinin okside olduğunu, bu nedenle aşırı derecede uyarılarak bazı radikallerin oluşumu hızının arttığını ve sonuçta fotosentetik pigmentlerin parçalandığını bildirmiştir. Buna göre Çetin-2000 genotipinde Al toksisitesinin fotosentetik pigment miktarını bu mekanizmalarla azalttığı söylenebilir. Bunun dışında yapılan bazı araştırmalarda da Al toksisitesinin bitkilerde, klorofil yapısında bulunana Mg ile Al'nin yer değiştirmesine yol açtığı, fotosentetik elektron taşınım ve Calvin reaksiyonlarını belli oranda inhibe ettiği, aminolevülinik asit dehidrataz enziminin aktivitesini azalttığı ortaya çıkarılmıştır (Cunha Neto ve ark., 2020; Pereira ve ark., 2000). Zeynelağa genotipinin ise fotosentetik pigment metabolizması bakımından Al toksisitesine daha dayanıklı olduğu söylenebilir.

Fotosentez, stres faktörlerinden en çok etkilenen fizyolojik olayların başında gelir . Özellikle FS II üzerindeki elektron hareketliliği, fotosentezde gerçekleşen tüm olayların hızıyla ilgili belirleyici bir etkiye sahiptir. Ayrıca FS II, fotosentetik aygıtın en hassas bölgesi olduğundan stres faktörlerinden ilk olarak etkilenen yerdir (Maxwell ve Johnson, 2000). Bu nedenle FS II'nin işleyişi hakkında bilgi edinmek, stres faktörünün fotosentez üzerindeki etkisinin hem kolay ve hızlı bir şekilde anlaşılmasını

sağlarken; hem de bitkinin stres faktörüne ne kadar toleranslı olduğunun hakkında bilgi edinilmesini sağlar.

Klorofil a floresans tekniği, farklı stres koşulları altında fotosentetik etkinliğin ölçülmesinde kullanılan en güvenilir yöntem olup stres koşulları altında FS II'nin işleyişi ve fotosentetik aygıt üzerinde oluşan hasarın boyutları hakkında önemli bilgiler verir. Bu tekniğin sunduğu önemli avantaj ise stres koşullarının bitki üzerinde belirgin morfolojik etkiler oluşturmasını beklemeden çok daha erken aşamada, bitkinin stresi tolere etme yeteneği hakkında yorum yapılabilmesini sağlamasıdır. Ayrıca bitkinin canlı yaprak dokuları üzerinden aktif bir şekilde fotosentetik performansı hakkında diğer yöntemlerle elde edilemeyen bazı bilgilerin çok kısa bir sürede elde edilmesini sağlaması da diğer önemli bir avantajıdır. (Kalaji ve ark., 2011).

Çalışmada Al uygulanan Çetin-2000 genotipinde Fo parametresinin kontrole göre azaldığı, Zeynelağa genotipinde ise arttığı belirlenmiştir. Al toksisitesi uygulanan Zeynelağa genotipinde Fo değeri, Çetin-2000 genotipine göre belirgin derecede daha yüksek bulunmuştur. Bazı araştırmacılar stres altındaki bitkilerde Fo değerinde kontrole göre gözlenen artışların nedeninin, ışık enerjisinin pigmentlerden reaksiyon merkezlerine taşınım hızının azalmasından veya reaksiyon merkezlerinin inaktif hale gelmesinden kaynaklandığını bildirmiştir (Briantais ve ark., 1986). Bunun dışında birçok stres faktörünün bitkilerde elektronların  $Q_A$ 'dan  $Q_B$ 'ye hareketini engelleyerek ve FS II birimlerinin ışığı yakalama etkinliğini inhibe ederek Fo değerini artırdığı belirlenmiştir (Kalaji ve ark., 2011). Buna göre Al toksisitesinin Zeynelağa genotipinde fotosentetik elektron taşınım reaksiyonlarını daha olumsuz yönde etkilediği ve fotoinhibisyona yol açtığı söylenebilir. Ancak Fm parametresinde Al toksisitesi etkisiyle meydana gelen değişimler Çetin-2000 genotipinde FS II birimlerinin akseptör bölgesinin daha kararsız hale geldiğini gösterirken; Zeynelağa genotipinde önemli bir değişime sebep olmamıştır. Fv/Fm parametresi ideal koşullar altında 0,83 civarında sayısal bir değere sahiptir ve bir stres indikatörü olarak görülmektedir. Björkman ve Demmig (1987) bu parametrede meydana gelen azalmaların fotoinhibisyon göstergesi olduğunu bildirmiştir. Çalışmada Al toksisitesi altındaki Zeynelağa genotipinde Fv/Fm değerinin kontrole göre önemli derecede azalması, bu genotipin Al toksisitesinin oluşturduğu fotoinhibisyona daha duyarlı olduğu fikrini akla getirmektedir (Maxwell ve Johnson, 2000). Ayrıca Al toksisitesi uygulanan iki genotip Fv/Fm ve  $\phi Po$  parametrelerinde meydana gelen değişimler

bakımından karşılaştırıldığında, Zeynelağa genotipinde primer fotokimyasal olayların belli oranda inhibe edildiği ve fotoinhibisyon olayının ortaya çıktığı söylenebilir.

Klorofil a floresansı sinyallerinde meydana gelen değişimleri zamana bağlı olarak gösteren logaritmik grafik “OJIP eğrisi” olarak bilinmektedir. Grafik üzerinde bulunan “O” noktası  $F_o$ , “P” noktasıysa  $F_m$  değerini ifade etmektedir.  $F_o$  ile  $F_m$  arasında kalan alan ise FS II'nin redükleyici kısmındaki  $Q_A$  seviyesi hakkında bilgi vermektedir. Yapılan bir çalışmada bu alanın tepkime merkezlerinden  $Q_A$ 'ya olan elektron taşınım hızının inhibe olması sonucu azaldığı rapor edilmiştir (Oukarroum ve ark., 2015). Çalışmada alan parametresinde Al toksisitesi uygulanan arpa genotiplerinde kontrollere göre önemli bir değişim gözlenmemiştir. Ancak iki genotip karşılaştırıldığında Çetin-2000 genotipinde Al uygulaması etkisiyle bu elektron taşınımının Zeynelağa genotipine göre belli oranda inhibe edildiği görülmektedir. Benzer şekilde  $F_v/F_o$  ve  $\Delta V/\Delta t_o$  parametrelerinde Al uygulaması sonucunda kontrollere göre önemli bir değişim gözlenmemiştir. Ancak iki genotip karşılaştırıldığında Al toksisitesinin Zeynelağa genotipinde FS II birimlerinin donör bölgesinde suyun parçalanması sonucu sistemde taşınacak elektronların oluşumunu sağlayan fotoliz olayını olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Çalışmada Al uygulamasının  $\Psi_o$  parametresini Çetin-2000 genotipinde kontrole göre önemli derecede azalttığı, Zeynelağa genotipinde ise önemli bir değişime neden olmadığı gözlenmiştir. Bu değişim Çetin-2000 genotipinde Al etkisiyle yakalanan bir eksitonun elektronları  $Q_A$ 'dan elektron taşınım sistemine aktarma yeteneğinin kısıtlandığını, Zeynelağa'da ise etkilenmediğini göstermektedir. Ancak Al toksisitesi altındaki iki genotip arasında bu açıdan anlamlı bir fark bulunmamıştır. Çalışmada Al toksisitesi altındaki her iki arpa genotipinde de  $\phi E_o$  ve  $\phi D_o$  parametreleri ilgili kontrollere göre önemli bir değişime uğramamıştır. Ancak genotipler birbiriyle kıyaslandığında  $\phi E_o$ 'ın Zeynelağa genotipinde azaldığı;  $\phi D_o$ 'ın ise arttığı gözlenmiştir. Buna göre Zeynelağa genotipinde Al etkisiyle  $Q_A$ 'dan plastokinona elektron taşınımının kuantum veriminin azaldığı; termal enerji dağıtımının kuantum veriminin ise arttığı söylenebilir. ABS/RC, TRo/RC, ETo/RC ve DIo/RC parametrelerinde Al toksisitesi uygulanan arpa genotiplerinde kendi kontrollerine göre önemli bir değişim gözlenmemiştir. Ancak bu parametrelerin tümü Al uygulaması sonucunda Çetin-2000 genotipi ile karşılaştırıldığında Zeynelağa'da önemli oranda artmıştır. Bu sonuçlar Al toksisitesi uygulanan Zeynelağa genotipinde inaktif reaksiyon merkezi miktarının, FS II'de

reaksiyon merkezi başına yakalanan ve  $Q_A$ 'nın indirgenmesini sağlayan maksimum enerji miktarının, FS II'de reaksiyon merkezi başına  $Q_A$ 'dan sonraki basamaklardaki maksimum elektron taşınım hızının ve FS II'de reaksiyon merkezi başına fotokimyasal olmayan olaylarla kaybedilen dissipasyon enerjisi miktarının arttığını göstermektedir. Bir başka deyişle Zeynelağa genotipinde Al toksisitesi etkisiyle elektron taşınım reaksiyonlarında kullanılmayan enerji ortama ısı olarak geri verilmektedir. Al uygulaması her iki arpa genotipinde ilgili kontrollere göre SFI(abs),  $\phi_0/(1-\phi_0)$  ve PI(abs) parametrelerinde önemli bir değişime neden olmazken;  $\Psi_0/(1-\Psi_0)$  parametresi Çetin-2000 genotipinde belirgin oranda azalmış, Zeynelağa'da önemli bir değişim göstermemiştir. Ancak genotipler karşılaştırıldığında Al toksisitesi altındaki Zeynelağa genotipinde SFI(abs),  $\phi_0/(1-\phi_0)$  ve PI(abs) parametrelerinin önemli derecede azaldığı;  $\Psi_0/(1-\Psi_0)$  parametresinin ise önemli bir değişiklik göstermediği görülmüştür. Bu sonuçlar Al uygulamasının Zeynelağa genotipinde FS II'yi yapısal ve fonksiyonel anlamda olumsuz yönde etkilediğini; CO<sub>2</sub> fiksasyon reaksiyonlarının ise iki genotipte benzer şekilde etkilendiğini göstermektedir.

Çalışmada klorofil a floresansı ile elde ettiğimiz verilerin analizinden çıkan sonuç; Çetin-2000'e kıyasla Zeynelağa genotipinin fotosentetik aktivitesinin Al toksisitesinden daha çok etkilendiği ancak Çetin-2000'de de bir takım fotosentetik aksaklıkların meydana geldiği yönündedir.

Dünya çapındaki var olan asidik toprak miktarı, çeşitli faaliyetler sonucu ortama yayılan kirleticilerin de etkisiyle her geçen gün artmaktadır. Al toksisitesi asitli topraklarda ürün miktarı ve kalitesindeki azalmanın en önemli nedenlerinden biri olarak görülmektedir (Wild, 1988). Günümüzde tarım arazilerine kireç, magnezyum veya kalsiyum ilâvesi gibi yaklaşımlarla asitli toprağın bitki büyümesi ve gelişimi üzerindeki olumsuz etkileri belirli oranlarda giderilmeye çalışılsa da (Pandey ve ark., 2013) bunlar hem ekonomik açıdan pahalı yöntemler olup hem de ekolojik olarak sürdürülebilir değildir. Bu nedenle asitli topraklarda ciddi bir sorun olan Al toksisitesine karşı toleranslı bitki genotiplerinin belirlenmesi, aynı zamanda toprak asiditesiyle baş etmenin en etkili yolu olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Abate, E., Hussien, S., Laing M., and Mengistu, F. (2013). Aluminum toxicity tolerance in cereals: Mechanisms, genetic control and breeding methods. *African Journal of Agricultural Research*, 8(9), 711-722.
- Abdelaal, K., AlKahtani, M., Attia, K., Hafez, Y., Király, L., and Künstler, A. (2021). The role of plant growth-promoting bacteria in alleviating the adverse effects of drought on plants. *Biology*, 10(6), 520.
- Alscher, R. G., Donahue, J. L., and Cramer, C. L. (1997). Reactive oxygen species and antioxidants: Relationships in green cells. *Physiologia Plantarum*, 100(2), 224-233.
- Alscher, R. G., Erturk, N., and Heath, L. S. (2002). Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53(372), 1331-1341.
- Anjum, N. A., Sharma, P., Gill, S. S., Hasanuzzaman, M., Khan, E. A., Kachhap, K., and Tuteja, N. (2016). Catalase and ascorbate peroxidase-representative H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-detoxifying heme enzymes in plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 19002-19029. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7309-6>.
- Anonim, (2014, 10 Temmuz). Dünya arpa pazarı ve Türkiye. <https://millermagazine.com/tr/blog/dunya-arpa-pazari-ve-turkiye-142> adresinden 2024, 17 Mayıs tarihinde alınmıştır.
- Aono, M., Kubo, A., Saji, H., Tanaka, K., and Kondo, N. (1993). Enhanced tolerance to photooxidative stress of transgenic *Nicotiana tabacum* with high chloroplastic glutathione reductase activity. *Plant and Cell Physiology*, 34(1), 129-135.
- Armendariz, A. L., Talano, M. A., Travaglia, C., Reinoso, H., Oller, A. L. W. and Agostini, E. (2016). Arsenic toxicity in soybean seedlings and their attenuation mechanisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, 98, 119-127.
- Asada, K. (1999). The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 50, 601-639.
- Ashenef, A. (2014). Essential and toxic metals in tea (*Camellia sinensis*) imported and produced in Ethiopia. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 7(1), 30-36.
- Ayaz, F. A. (2001). Changes in phenolic acids of cherry laurel (*Laurocerasus officinalis* Oxygemmis) fruit during maturation. *Acta Biologica Cracoviensia, Series Botanica*, 43, 23-26.
- Ayhan, B. (2006). *Mısır (Zea mays L.)'ın bazı çeşitlerinde ağır metal (Cd, Pb) stresinin etkilerinin belirlenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Hacettepe Üniversitesi.

- Barceló, J., and Poschenrieder, C. (2002). Fast root growth responses, root exudates and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 48(1), 75–92.
- Bartley, G. E., and Scolnik, P. A. (1995). Plant carotenoids: pigments for photoprotection, visual attraction, and human health. *The Plant Cell*, 7(7), 1027.
- Baykal, F. (2006). Tuz stresinin Triticale ve bazı Secale taksonlarında süperoksit dismütaz (SOD; EC 1.15. 1.1) ve peroksidaz (POD; EC 1.11. 1.7) aktiviteleri üzerine etkilerinin araştırılması [Yüksek lisans tezi]. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.
- Bayraklı, F. (1987). Soil and plant analysis. Fac. of Agric., Univ. of Nineteen, Samsun, Turkey. No. 17.
- Berwal, M., and Ram, C. (2018). Superoxide dismutase: A stable biochemical marker for abiotic stress tolerance in higher plants. *Abiotic and Biotic Stress in Plants*, 1-10. DOI: 10.5772/intechopen.82079.
- Bian, M., Zhou, M., Sun, D., and Li, C. (2013). Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants. *The Crop Journal*, 1(2), 91-104.
- Bilaloğlu, G. V., ve Harmandar, M., (1999). *Flavonoidler*, Bakanlar Matbaacılık Ltd. Şti.
- Björkman, O., and Demmig, B. (1987). Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77K among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 170, 489-504.
- Blamey, F. P. C., Asher, C. J., Edwards, D. C., and Kerven, G. L. (1993). In vitro evidence of aluminum effects on solution movement through root cell walls. *Journal of Plant Nutrition*, 16(4), 555-562.
- Blarney, F. P. C., Nishizawa, N. K., and Yoshimura, E. (2004). Timing, magnitude, and location of initial soluble aluminum injuries to mungbean roots. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1), 67-76.
- Bose, J., Babourina, O., and Rengel, Z. (2011). Role of magnesium in alleviation of aluminium toxicity in plants. *Journal of Experimental Botany*, 62(7), 2251-2264.
- Bowler, C., Van Montagu M., and Inzé, D. (1992). Superoxide dismutase and stress tolerance. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 43(1), 83–116. doi:10.1146/annurev.pp.43.060192.000503.
- Bray, E. A., Bailey-Serres, J., and Weretilnyk, E. (2000). Responses to abiotic stresses, in *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Buchanan, B. B., Gruissem, W., and Jones, R. L. (Eds.), *American Society of Plant Physiologists* (pp.1158-1202), Rockville, Maryland.
- Briantais, J. M., Vernotte, C., Krause, G. H., and Weis, E. (1986). Chlorophyll a fluorescence of higher plants: chloroplasts and leaves. In: Govindjee, A. J., Fork, D. C. (Eds.), *Light emission by plants and bacteria* (pp. 539-577). New York: Academic Press.

- Briviba, K., Klotz, L. O., and Sies, H. (1997). Toxic and signaling effects of photochemically or chemically generated singlet oxygen in biological systems. *Biological Chemistry*, 378(11), 1259-1265.
- Bussotti, F., Strasser, R.J., and Schaub, M. (2007). Photosynthetic behaviour of woody species under high ozone exposure probed with the JIP-test: a review. *Environmental Pollution*, 147(3), 430-437.
- Büyük, İ., Soydam-Aydın, S., ve Aras, S. (2012). Bitkilerin stres koşullarına verdiği moleküler cevaplar. *Turkish Bulletin of Hygiene & Experimental Biology/Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji*, 69(2). DOI: 10.5505/TurkHijyen.2012.40316.
- Cakmak, I., and Horst, W. J. (1991). Effect of aluminium on net efflux of nitrate and potassium from root tips of soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Plant Physiology*, 138(4), 400-403.
- Canavar, S. (2018). *Bazı arpa (Hordeum vulgare L.) genotiplerinde tuz toleransının fizyolojik ve biyokimyasal olarak araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Čiamporová, M. (2002). Morphological and structural responses of plant roots to aluminium at organ, tissue, and cellular levels. *Biologia Plantarum*, 45(2), 161-171.
- Cobanoğlu, H., Sevik, H., and Koç, İ. (2023). Do annual rings reveal Cd, Ni, and Zn pollution in the air related to traffic density? An example of the Cedar tree. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(2), 65.
- Collins, A. R. (2001). Carotenoids and genomic stability. *Mutation Res./Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 475(1-2), 21-28.
- Cruz-Ortega, R., Cushman, J. C., and Ownby, J. D. (1997). cDNA clones encoding 1, 3- $\beta$ -glucanase and a fimbrin-like cytoskeletal protein are induced by Al toxicity in wheat roots. *Plant Physiology*, 114(4), 1453-1460.
- Cunha Neto, A. R., Ambrósio, A. S., Wolowski, M., Westin, T. B., Govêa, K. P., Carvalho, M., and Barbosa, S. (2020) Negative effects on photosynthesis and chloroplast pigments exposed to lead and aluminum: a meta-analysis. *Cerne*, 26(2), 232-237.
- Çakır, S. (2007). *Selenyum toksisitesinin iki arpa (Hordeum vulgare L.) çeşitinde (Tarm 92, Bülbül 89) antioksidan enzim aktivitesine etkisi* [Yüksek lisans tezi]. Erciyes Üniversitesi.
- Dalvi, A. A., and Bhalerao, S. A. (2013). Response of plants towards heavy metal toxicity: an overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism. *Annals of Plant Sciences*, 2(9), 362-368.
- Dar, F. A., Tahir, I., Hakeem, K. R., and Rehman, R. U. (2022). Silicon application enhances the photosynthetic pigments and phenolic/flavonoid content by modulating the phenylpropanoid pathway in common buckwheat under aluminium stress. *Silicon*, 14(1), 323-334.
- Dar, M. I., Naikoo, M. I., Khan, F. A., Rehman, F., Green, I. D., Naushin, F., and Ansari, A. A. (2017). An introduction to reactive oxygen species metabolism under changing climate in plants. *Reactive Oxygen Species and Antioxidant Systems in Plants: Role and Regulation Under Abiotic Stress*, 25-52.

- Das, K., and Roychoudhury, A. (2014). Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 53. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>.
- Dat, J., Vandenabeele, S., Vranova, E., Van Montagu, M., Inzé, D., and Van Breusegem, F. (2000). Dual action of the active oxygen species during plant stress responses. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 57, 779-795.
- Dawood, M., Cao, F., Jahangir, M. M., Zhang, G., and Wu, F. (2012). Alleviation of aluminum toxicity by hydrogen sulfide is related to elevated ATPase, and suppressed aluminum uptake and oxidative stress in barley. *Journal of Hazardous Materials*, 209, 121-1.
- del Río, L. A., Corpas, F. J., López-Huertas, E., and Palma, J. M. (2018). Plant superoxide dismutases: Function under abiotic stress conditions. *Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants*, 1-26.
- Delhaize, E., and Ryan, P.C. (1995). Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology*, 107(2), 315-321.
- Doğru, A. (2006). *Kolza (Brassica napus L. ssp. oleifera)'nın bazı kışlık çeşitlerinde düşük sıcaklık toleransı ile ilgili fizyolojik ve biyokimyasal parametrelerin araştırılması* [Doktora tezi]. Hacettepe Üniversitesi.
- Doğru, A. (2014, 23-27, Haziran). Farklı mısır genotiplerinde tuz stresinin antioksidant system üzerindeki etkileri [Poster sunum]. 22. Ulusal Biyoloji Kongresi, Eskişehir, Türkiye.
- Doğru, A. (2019). Bazı arpa genotiplerinde kurşun toleransının klorofil a floresansı ile değerlendirilmesi. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Science*, 2(2), 228-238.
- Dubey, S., Shri, M., Gupta, A., Rani, V., and Chakrabarty, D. (2018). Toxicity and detoxification of heavy metals during plant growth and metabolism. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 1169–1192.
- Duffus, J. (2002). Heavy metals a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 74, 793-807.
- Eekhout, T., Larsen, P., and De Veylder, L. (2017). Modification of DNA checkpoints to confer aluminum tolerance. *Trends in Plant Science*, 22(2), 102-105.
- Ekmekçi, Y., and Terzioğlu, S. (2005). Effects of oxidative stress induced by paraquat on wild and cultivated wheats. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 83, 69-81.
- El-Amier, Y., Elhindi, K., El-Hendawy, S., Al-Rashed, S., and Abd-ElGawad, A. (2019). Antioxidant system and biomolecules alteration in *Pisum sativum* under heavy metal stress and possible alleviation by 5-aminolevulinic acid. *Molecules*. 24(22), 4194. <https://doi.org/10.3390/molecules24224194>.
- Elliot, G. (1999). Application of antioxidant vitamins in foods and beverages. *Food Technology*, 53(2), 46-48.
- Ezaki B., Yamamoto Y., and Matsumoto H. (1995). Cloning and sequencing of the cDNAs induced by aluminium treatment and Pi starvation in tobacco cultured cells. *Physiologia Plantarum*, 93(1), 11-18.

- Ezaki, B., Gardner, R. C., Ezaki, Y., and Matsumoto, H. (2000). Expression of aluminum-induced genes in transgenic Arabidopsis plants can ameliorate aluminum stress and/or oxidative stress. *Plant Physiology*, 122(3), 657-666.
- Ezaki, B., Nagao, E., Yamamoto, Y., Nakashima, S., and Enomoto, T. (2008). Wild plants, *Andropogon virginicus* L. and *Miscanthus sinensis* Anders, are tolerant to multiple stresses including aluminum, heavy metals and oxidative stresses. *Plant Cell Reports*, 27, 951-961.
- Farouk, S. (2011). Ascorbic acid and a-Tocopherol minimize salt-induced wheat leaf senescence. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 7(3), 58-79.
- Flora, S. J. (2007). Role of free radicals and antioxidants in health and disease. *Cellular and Molecular Biology*, 53(1), 1-2.
- Foy, C. D. (1992). Soil chemical factors limiting plant root growth. In *Limitations to plant root growth* (pp. 97-149). New York, NY: Springer New York.
- Foyer, C. H., Lelandais, M., and Kunert, K. J. (1994). Photooxidative stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 92, 696-717.
- Foyer, C. H., and Noctor, G. (2005). Redox homeostis and antioxidant signaling: ametabolic Interface between stress perception and physiological responses. *Plant Cell*, 17, 1866-1875.
- Gechev, T. S., Van Breusegem, F., Stone, J. M., Denev, I., and Laloi, C. (2006). Reactive oxygen species as signals that modulate plant stress responses and programmed cell death. *Bioessays*, 28(11), 1091-1101.
- Gey, K. F., Puska, P., Jordan, P., and Moser, U. K. (1991). Inverse correlation between plasma vitamin E and mortality from ischemic heart disease in cross-cultural epidemiology. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 53(1), 326-334.
- Ghori, N. H., Ghori, T., Hayat, M. Q., Imadi, S. R., Gul, A., Altay, V., and Ozturk, M. (2019). Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1807-1828.
- Gibon, Y., Bessieres, M. A., and Larher, F. (1977). Is glycine betaine a non-compatible solute in higher plants that do not accumulate it. *Plant Cell & Environment*, 20(3), 329-340.
- Gill, S. S., and Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909- 930.
- Govindjee, (2004). Chlorophyll a fluorescence: a bit of basics and history. In: Papageorgiou, G.C., Govindjee (Eds), *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis* (pp. 1-41). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Gratão, P. L., Polle, A., Lea, P. J., and Azevedo, R. A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Funct. Plant Biol.*, 32(6), 481-494.
- Gull, A., Lone, A. A., and Wani, N. U. I. (2019). Biotic and abiotic stresses in plants. *Abiotic and Biotic Stress in Plants*, 1-19. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85832>.
- Guo, T. R., Zhang, G. P., Zhou, M. X., Wu, F. B., and Chen, J. X. (2003). Genotypic difference in plant growth and mineral composition in barley under aluminum stress. *Agricultural Sciences in China*, 2 (5), 494- 501.

- Gutteridge, J. M., and Halliwell, B. (1990). The measurement and mechanism of lipid peroxidation in biological systems. *Trends in Biochemical Sciences*, 15(4), 129-135.
- Gürel, A., and Avcioğlu, R. (2001). *Bitkilerde Dayanıklılık Fizyolojisi. Bitki Biyoteknolojisi II. Genetik Mühendisliği ve Uygulamaları Kitabı* (21, 308-313). SÜ Vakfı Yayınları.
- Hale, G. M., and Orcutt, D. M. (1987). *The Physiology of Plants under Stress* (1-4 pp), John Wiley & Sons.
- Harborne, J. B., and Williams, C. A. (2000). Advances in Flavonoid Research Since 1992. *Phytochemistry*, 55(6), 481-504.
- Harlan, J. R., and Zohary, D. (1966). Distribution of wild wheats and barley: the present distribution of wild forms may provide clues to the regions of early cereal domestication. *Science*, 153(3740), 1074-1080.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Parvin, K., Bhuiyan, T. F., Anee, T. I., Nahar, K., and Fujita, M. (2020a). Regulation of ROS metabolism in plants under environmental stress: a review of recent experimental evidence. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(22), 8695. <https://doi.org/10.3390/ijms21228695>.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., and Fotopoulos, V. (2020b). Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>.
- Hasenstein, K. H., and Evans, M. L. (1988). Effects of cations on hormone transport in primary roots of *Zea mays*. *Plant Physiology*, 86(3), 890-894.
- Hoagland, D. (1920). Optimum nutrient solutions for plants. *Sci.*, 52(1354), 562-564.
- Hollander-Czytko, H., Grabowski, J., Sandorf, I., Weckermann, K., and Weiler, E.W. (2005). Tocopherol content and activities of tyrosine aminotransferase and cystine lyase in *Arabidopsis* under stress conditions. *J. Plant Physiol*, 162, 767-770.
- Housset, J. M., Nadeau, S., Isabel, N., Depardieu, C., Duchesne, I., Lenz, P., and Girardin, M. P. (2018). Tree rings provide a new class of phenotypes for genetic associations that foster insights into adaptation of conifers to climate change. *New Phytologist*, 218(2), 630-645.
- Hrivnák, M., Paule, L., Krajmerová, D., Kulaç, Ş., Şevik, H., Turna, İ., and Gömöry, D. (2017). Genetic variation in tertiary relics: The case of eastern-Mediterranean *Abies* (Pinaceae). *Ecology and Evolution*, 7(23), 10018-10030.
- Hufnagel, B., Guimaraes, C. T., Craft, E. J., Shaff, J. E., Schaffert, R. E., Kochian, L.V., and Magalhaes, J. V. (2018). Exploiting sorghum genetic diversity for enhanced aluminum tolerance: Allele mining based on the Alt SB locus. *Scientific Reports*, 8(1), 10094.
- Huner, N. P. A., Öqüist, G., and Sarhan, F. (1988). Energy balance and acclimation to light and cold. *Trends in Plant Science*, 3 (6): 224-230.
- IGBP-DIS (1998) SoilData(V.0) A program for creating global soil-property databases, IGBP Global Soils Data Task, France.

- Ishtiyag, S., Kumar, H., Varun, M., Kumar, B., and Paul, M. S. (2018). Heavy metal toxicity and antioxidative response in plants: An overview. *Plants Under Metal and Metalloid Stress*, 77-106. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2242-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2242-6_3).
- Isinkaralar, K., Koc, I., Erdem, R., and Sevik, H. (2022). Atmospheric Cd, Cr, and Zn deposition in several landscape plants in Mersin, Türkiye. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(4), 120.
- Jamla, M., Khare, T., Joshi, S., Patil, S., Penna, S., and Kumar, V. (2021). Omics approaches for understanding heavy metal responses and tolerance in plants. *Current Plant Biology*, 27, 100213.
- Jiménez, A., Hernández, J. A., Pastori, G., del Río, L. A., and Sevilla, F. (1998). Role of the ascorbate-glutathione cycle of mitochondria and peroxisomes in the senescence of pea leaves. *Plant Physiology*, 118(4), 1327-1335.
- Jones, D. L., Blancaflor, E. B., Kochian, L. V., and Gilroy, S. (2006). Spatial coordination of aluminium uptake, production of reactive oxygen species, callose production and wall rigidification in maize roots. *Plant, Cell & Environment*, 29(7), 1309-1318.
- Juknys, R., Vitkauskaitė, G., Račaitė, M., and Vencloviėnė, J. (2012). The impacts of heavy metals on oxidative stress and growth of spring barley. *Central European Journal of Biology*, 7, 299-306. <https://doi.org/10.2478/s11535-012-0012-9>.
- Kacar, B. (1972). *Bitki ve Toprağın Kimyasal Analizler: II, Bitki Analizleri* (543-581 ss.). Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları.
- Kadıoğlu, A. (2007). *Bitki Fizyolojisi (4. Baskı). Ra Kitapevi*.
- Kalaji, H. M., Govindjee, Bosa, K., Kościelniak, J., and Zuk-Gołaszewska, K. (2011). Effects of salt stress on photosystem II efficiency and CO<sub>2</sub> assimilation of two Syrian barley landraces. *Environmental and Experimental Botany*, 73, 64–72.
- Kamal-Eldin, A., and Appelqvist, L. A. (1996). The chemistry and antioxidant properties of tocopherols and tocotrienols. *Lipids*, 31(7), 671-701.
- Karuppanapandian, T., Moon, J. C., Kim, C., Manoharan, K., and Kim, W. (2011). Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6), 709-725.
- Kaval, A. (2016). *Bryophyllum daigremontiarum (Raym.-Hamet & Perrier) A. Berger bitkisinde alüminyum stresine bağlı değişikliklerin fizyolojik yöntemler ve moleküler işaretleyiciler (RAPD ve ISSR) ile araştırılması* [Yüksek lisans tezi]. Düzce Üniversitesi.
- Khan, N. A., and Singh, S. (2008). *Abiotic stress and plant responses*. IK International Pub. House.
- Kliebenstein, D. J., Dietrich, R. A., Martin, A. C., Last, R. L., and Dangl, J. L. (1999). LSD1 regulates salicylic acid induction of copper zinc superoxide dismutase in *Arabidopsis thaliana*. *Mol. Plant-Microbe Interac*, 12(11), 1022-1026.
- Kochian, L. V. (1995). Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 46, 237-260.

- Kochian, L. V., Hoekenga, O. A., and Pineros, M. A. (2004). How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annu. Rev. Plant Biol*, 55, 459-493.
- Kochian, L. V., Piñeros, M. A., Liu, J., and Magalhaes, J. V. (2015). Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. *Annual Review of Plant Biology*, 66(1), 571-598.
- Kochian, L.V., Shaff, J. E., and Ryan, P. R. (1991). Microelectrode-based investigations into the relationship between Al toxicity and root-cell membrane transport process. *Curr. Topics Plant Biochemistry Physiology*, 10, 117-133.
- Koç, İ. (2022a). Comparison of the gas exchange parameters of two maple species (*Acer negundo* and *Acer pseudoplatanus*) seedlings under drought stress. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 24(1), 65-76.
- Koç, İ. (2022b). Determining the near-future biocomfort zones in Samsun province by the global climate change scenarios. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 22(2), 181-192.
- Koç, İ., Cantürk, U., and Çobanoğlu, H. (2022). Changes of plant nutrients K and Mg in several plants based on traffic density and organs. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 8(1), 54- 59.
- Kumar, A., Jigyasu, D. K., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Shabnam, A. A., Cabral-Pinto, M. M. S., and Bhatia, A. (2021). Nickel in terrestrial biota: Comprehensive review on contamination, toxicity, tolerance and its remediation approaches. *Chemosphere*, 275, 129996.
- Lambers, H., and Oliveira, R. S.(2019). Growth and allocation. *Plant Physiological Ecology* (pp. 385-449). Springer.
- Larson, R. (1988). The antioxidants of higher plants. *Phytochemistry*, 27, 969-978.
- Leung, D. W. (2018). Studies of catalase in plants under abiotic stress. *Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants*, 27-39. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75088-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75088-0_2).
- Levitt, J. (1980). Responses of plants to environmental stresses. *Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses* (Vol. 1, pp.345- 497). Academic Press.
- Li, C., Zhang, G., and Lance, R. (2007). Recent advances in breeding barley for drought and saline stress tolerance. *Advances in Molecular Breeding Toward Drought and Salt Tolerant Crops*, 603-626.
- Li ChaoSu, L. C., Liu Peng, L. P., Xu GenDi, X. G., Zhang XiaoYan, Z. X., He WenBin, H. W., and Zhou DiYing, Z. D. (2006). Ameliorating effects of exogenous organic acids on aluminum toxicity in buckwheat seedlings. *Acta Agronomica Sinica*, 32(4), 532-539.
- Li, H., Yang, L. T., Qi, Y. P., Guo, P., Lu, Y. B., and Chen, L. S. (2016). Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Biological macromolecules*, 126, 91-100.
- Li, X. F., Ma, J. F., and Matsumoto, H. (2000). Pattern of aluminum-induced secretion of organic acids differs between rye and wheat. *Plant physiology*, 123(4), 1537-1544.

- Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M. R., and Wu, H. (2020). The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 80- 89.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology* (Vol. 148, pp. 350-382), Academic Press.
- Llanes, A. S., Andrade, A. M., Alemanno, S. G., and Luna, M. V. (2016). Alterations of endogenous hormonal levels in plants under drought and salinity. *American Journal of Plant Sciences*, 7, 1357.
- Ma, J. F. (2000). Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants. *Plant and Cell Physiology*, 41(4), 383-390.
- Ma, J. F., Chen, Z. C., and Shen, R. F. (2014). Molecular mechanisms of Al tolerance in gramineous plants. *Plant and Soil*, 381, 1-12.
- Macar, O., Kalefetoğlu Macar, T., Çavuşoğlu, K., and Yalçın, E. (2020). Protective effects of anthocyanin-rich bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) extract against copper (II) chloride toxicity. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 1428-1435.
- MacGregor, S. (1998). Composition of barley related to food uses. *Presented at International Food Barley Program, Canadian International Grains Institute in Winnipeg, Manitoba* (October 19 to 22), Canada.
- Mancinelli, A. L., Yang, C. P. H., Lindquist, P., Anderson, O. R., and Rabino, I. (1975). Photocontrol of anthocyanin synthesis: III. The action of streptomycin on the synthesis of chlorophyll and anthocyanin. *Plant Physiology*, 55(2), 251-257.
- Mansoor, S., Kour, N., Manhas, S., Zahid, S., Wani, O. A., Sharma, V., and Ahmad, P. (2021). Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity. *Chemosphere*, 271, 129458.
- Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (2nd ed.). Academic Press.
- Martinez, V. P., Torres, J. T., and Valdes, A. F. (2017). Recycling of aluminum beverage cans for metallic foams manufacturing. *Journal of Porous Materials*, 24, 707-712.
- Matsumoto, H. (2000). Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher. *Plants, Int Rev Cytol*, 200: 1.
- Matsumoto, H., and Motoda, H. (2013). Oxidative stress is associated with aluminum toxicity recovery in apex of pea root. *Plant and Soil*, 363, 399-410.
- Matsumoto, H., Senoo, Y., Kasai, M., and Maeshima, M. (1996). Response of the plant root aluminum stress: Analysis of the inhibition of the root elongation and changes in membrane function. *Journal of Plant Research*, 109, 99-105.
- Maxwell, K., and Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659-668.
- McIntosh, G. H., and Russell, G. R. (1988). The role of barley in human nutrition. In: Sparrow, D. H. B., Lance, R. C. M. & R.J. Henry, R. J. (Eds.), *Alternative End Uses of Barley* (pp. 49-59), Royal Australian Chemical Institute, Parkville.

- Mehla, N., Sindhi, V., Josula, D., Bisht, P., and Wani, S. H. (2017). An introduction to antioxidants and their roles in plant stress tolerance. *Reactive Oxygen Species and Antioxidant Systems in Plants: Role and Regulation Under Abiotic Stress*, 1-23.
- Merken, H. M., Merken, C. D., and Beecher, G. R. (2001). Kinetics method for the quantitation of anthocyanins, flavonal and flavones in foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(6), 2727-2732.
- Metwally, A., Finkemeier, I., Georgi, M., and Dietz, K. J. (2003). Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. *Plant Physiology*, 132(1), 272-281.
- Meyer, A. J. (2008). The integration of glutathione homeostasis and redox signaling. *Journal of Plant Physiology*, 165(3), 1390-1403.
- Mi, Y., Tong, K., Zhu, G., Zhang, X., Liu, X., and Si, Y. (2021). Surface spraying of anthocyanin through antioxidant defense and subcellular sequestration to decrease Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains in a lead–zinc mine area. *Environmental Geochemistry and Health*, 43, 1855-1866.
- Minella, E., and Sorrells, M. E. (1992). Aluminum tolerance in barley: genetic relationships among genotypes of diverse origin. *Crop Sci.*, 32(3), 593-598.
- Mittler, R. (2017). ROS are good. *Trends in Plant Science*, 22(1), 11-19.
- Mittler, R., and Zilinskas, B. A. (1992). Molecular cloning and characterization of a gene encoding pea cytosolic ascorbate Peroxidase. *J. Biol. Chem.*, 267(30), 21802-21807.
- Mohammadi, M. A., Cheng, Y., Aslam, M., Jakada, B. H., Wai, M. H., Ye, K., and Qin, Y. (2021). ROS and oxidative response systems in plants under biotic and abiotic stresses: revisiting the crucial role of phosphite triggered plants defense response. *Frontiers in Microbiology*, 12, 631318. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631318>.
- Montillet, J. L., Chamnongpol, S., Rustérucci, C., Dat, J., Van De Cotte, B., Agnel, J. P., ... and Triantaphylides, C. (2005). Fatty acid hydroperoxides and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in the execution of hypersensitive cell death in tobacco leaves. *Plant Physiology*, 138(3), 1516-1526.
- Morkunas, I., Wozniak, A., Mai, V.C., Rucinska-Sobkowiak, R., and Jeandet, P. (2018). The role of heavy metals in plant response to biotic stress. *Molecules*, 23, 2320-2350.
- Moustakas, M., Ouzounidou, G., and Lannoye, R. (1995). Aluminum effect on photosynthesis and elemental uptake in an aluminum-tolerant and nontolerant wheat cultivar. *Journal of Plant Nutrition*, 18(4), 669-683.
- Mu, Q., Guo, T., Li, X., and Yu, J. (2022). Phenotypic plasticity in plant height shaped by interaction between genetic loci and diurnal temperature range. *New Phytologist*, 233(4), 1768-1779.
- Mugwira, L. M., Elgawhary, S. M., and Patel, K. I. (1976). Differential tolerances of Triticale, wheat, rye and barley to aluminum in nutrient solution. *Agronomy Journal*, 68(5), 782–787.

- Mullineaux, P. M., and Rausch, T. (2005). Glutathione, photosynthesis and the redox regulation of stress-responsive gene expression. *Photosynthesis Research*, 86, 459-474.
- Munné-Bosch, S. (2005). The role of a-tocopherol in plant stress tolerance. *Journal of Plant Physiology*, 162(7), 743-748.
- Musyimi, D. M. (2023). Effect of aluminium stress on germination, growth, and photosynthetic pigments of *amaranthus hybridus*. *Journal of Biodiversity and Biotechnology*, 3(1), 44-50.
- Niyogi, K. K., Shih, C., Soon Chow, W., Pogson, B. J., DellaPenna, D., and Björkman, O. (2001). Photoprotection in a zeaxanthin-and lutein-deficient double mutant of *Arabidopsis*. *Photosynthesis research*, 67, 139-145.
- Noctor, G., and Foyer, C. H. (1998). A re-evaluation of the ATP: NADPH budget during C<sub>3</sub> photosynthesis: a contribution from nitrate assimilation and its associated respiratory activity? *Journal of Experimental Botany*, 49(329), 1895-1908.
- Nunes-Nesi, A., Brito, D. S., Inostroza-Blancheteau, C., Fernie, A. R., and Araújo, W. L. (2014). The complex role of mitochondrial metabolism in plant. *Trends in Plant Science*, 19(6), 399-407.
- Onat, T., Emerk, K., and Sözmen, E. Y. (2002). *İnsan Biyokimyası*, Palme Yayıncılık.
- Oukarroum, A., Bussotti, F., Goltsev, V., and Kalaji, H. M. (2015). Correlation between reactive oxygen species production and photochemistry of photosystems I and II in *Lemna gibba* L. plants under salt stress. *Env Exp Bot*, 109, 80-88.
- Packer, L., Hiramatsu, M., and Yoshikawa, T. (1999). *Antioxidant Food Supplements in Human Health*. Academic Press.
- Pan, J. W., Zhu, M. Y., and Chen, H. (2001). Aluminum-induced cell death in root-tip cells of barley. (2001). *Environmental and Experimental Botany*, 46(1), 71-79.
- Pan, L., Luo, Y., Wang, J., Li, X., Tang, B., Yang, H., and Zou, X. (2022). Evolution and functional diversification of catalase genes in the green lineage. *BMC Genomics*, 23(1), 411. <https://doi.org/10.1186/s12864-022-08621-6>.
- Pandey, P., Srivastava, R. K., and Dubey, R. S. (2013). Salicylic acid alleviates aluminum toxicity in rice seedlings better than magnesium and calcium by reducing aluminum uptake, suppressing oxidative damage and increasing antioxidative defense. *Ecotoxicology*, 22, 656-670.
- Pereira, W. E., de Siqueira, D. L., Martínez, C. A., and Puiatti, M. (2000). Gas exchange and chlorophyll fluorescence in four citrus rootstocks under aluminum stress. *J Plant Physiol*, 157(5), 513-520.
- Petrucci, R. H. (1985). *General Chemistry*. Macmillian Publishing Company.
- Polidoros, N.A., and Scandalios, J. G. (1999). Role of hydrogen peroxide and different classes of antioxidants in the regulation of catalase and glutathione S transferase gene expression in maize (*Zea mays* L.). *Plant Physiol*, 106, 112-120.

- Poschenrieder, C., Gunsé, B., Corrales, I., and Barceló, J. (2008). A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of the Total Environment*, 400(1-3), 356-368.
- Qamer, Z., Chaudhary, M. T., Du, X., Hinze, L., and Azhar, M. T. (2021). Review of oxidative stress and antioxidative defense mechanisms in *Gossypium hirsutum* L. in response to extreme abiotic conditions. *Journal of Cotton Research*, 4(1), 9
- Quian, L., Huang, P., Hu, Q., Quian, Y., Xu, S., and Wang, R. (2018). Morpho-physiological responses of an aluminum stressed rice variety 'liangyoupei 9'. *Pakistan Journal of Botany*, 50(3), 893-899.
- Quick, W. P., and Horton, P. (1984). Studies on the induction of chlorophyll fluorescence in barley protoplasts. I. Factor affecting the observation of oscillations in the yield of chlorophyll fluorescence and the rate of oxygen evolution. *Proceed. of the Royal Soc. London Series B Biological Sciences*, 220(1220), 361-370.
- Rahimian, M., Parvin, N., and Ehsani, N. (2011). The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite. *Materials and Design*, 32 (2), 1031-1038.
- Rahman, M., Lee, S. H., Ji, H. C., Kabir, A. H., Jones, C. S., and Lee, K. W. (2018). Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: current status and opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10).
- Rampim, L., and Lana, M. (2013). Mecanismo de tolerância interna das plantas ao alumínio. *Colloquium Agrariae*, 9(2), 72-89.
- Rausch, T., and Wachter, A. (2005). Sulfur metabolism: a versatile platform for launching defence operations. *Trends Plant Sci.*, 10, 503-509.
- Read, B. J., and Oram, R. N. (1995). *Hordeum vulgare* (Barley) cv. Brindabella. *Aust J Exp Agric.*, 35(3), 425.
- Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., and Jackson, R. B. (2013). *Campbell Biyoloji* (Çev: Gündüz, E. ve Türkan, İ.). Palmiye Yayıncılık.
- Reid, D. A., Jones, G. D., Armiger, W. H., Foy, C. D., Koch, E. J. and Starling, T. M. (1969). Differential aluminum tolerance of winter barley varieties and selections in associated greenhouse and Weld experiments. *Agronomy Journal*, 61(2), 218-222.
- Rengel, Z. (1992). Role of calcium in aluminum toxicity. *New Phytology*, 121, 499-513.
- Richards, K. D., Schott, E. J., Sharma, Y. K., Davis, K. R., and Gardner, R. C. (1998). Aluminum induces oxidative stress genes in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*, 116(1), 409-418.
- Rout, G., Samantaray, S., and Das, P. (2001). Aluminium toxicity in plants: a review. *Agronomie*, 21(1), 3-21.
- Ryan, P. R., Kinraide, T. B., and Kochian, L. V. (1993). Al<sup>3+</sup>-Ca<sup>2+</sup> interactions in aluminum rhizotoxicity. *Planta*, 192(1), 98-103.

- Ryan, P.R., Tyerman, S.D., Sasaki, T., Yamamoto, Y., Zhang, W.H., and Delhaize, E. (2010). Identification of aluminium-resistance genes in plants provides an opportunity for enhancing the acid-soil tolerance of crop species. *J Exp Bot.*, 62:9-20.
- Sade, H., Meriga, B., Surapu, V., Gadi, J., Sunita, M. S. L., Suravajhala, P., and Kavi Kishor, P. B. (2016). Toxicity and tolerance of aluminum in plants: tailoring plants to suit to acid soils. *Biometals*, 29, 187-210.
- Sairam, R. K., Deshmukh, P. S., and Shukla, D. S. (1997). Tolerance to drought and temperature stress in relation to increased antioxidant enzyme activity in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Sciences*, 178(3), 171-178.
- Sakai, A., and Larcher, W. (1987). Frost survival of plants. *Responses and adaptations to freezing stress* (pp. 321). Springer-Verlag.
- Salisbury, F. B., and Ross, C. W. (1992). *Plant Physiology* (4.ed.). Wadsworth Publishing Company.
- Sami, A., Shah, F. A., Abdullah, M., Zhou, X., Yan, Y., Zhu, Z., and Zhou, K. (2020). Melatonin mitigates cadmium and aluminium toxicity through modulation of antioxidant potential in *Brassica napus* L.. *Plant Biology*, 22(4), 679-690.
- Sasaki, M., Yamamoto, Y., and Matsumoto, H. (1996). Lignin deposition induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) Roots. *Physiology Plant*, 96(2), 193-198.
- Scandalios, J. G. (1990). Response of plant antioxidant defense genes to environmental stress. *Advances in Genetics*, 28, 1-41.
- Seçkin, B. (2010). *Tokat Kozava yöresi topraklarında tuz dinamiği ve sodikleşme eğiliminin belirlenmesi* [Doktora tezi]. Ege Üniversitesi.
- Seçmen, Ö., Gemici, Y., Görk, G., Bekat, L., ve Leblebici, E. (2000). *Tohumlu bitkiler sistemetiği* (ss. 317-319), Ege Üniv. Fen Fakültesi Kitaplar Serisi.
- Sevinç, M. (2003). *Kimyasal Analiz Yöntemleri*. Beril Yayınları.
- Shahidi, F., and Naczki, M. (1995). *Food Phenolics: Sources, Chemistry Effect Applications*. Technomic Publication Company.
- Shakhathreh, Y., Haddad, N., Alrababah, M., Grando, S., and Ceccarelli, S. (2010). Phenotypic diversity in wild barley (*Hordeum vulgare* L. ssp. *spontaneum* (C. Koch) Thell.) accessions collected in Jordan. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 57(1), 131-146.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S., and Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, 1-26. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>.
- Sharma, P., Sharma, S., and Khanduja, D. (2015). Production and some properties of  $Si_3N_4$  reinforced aluminium alloy composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3,352-359. DOI: 10.1016/j.jascer.2015.07.002.
- Siefermann-Harms, D. (1987). The light-harvesting and protective functions of carotenoids in photosynthetic membranes. *Physiologia Plantarum*, 69(3), 561-568.

- Silva, F., Borges, F., Guimaraes, C., Lima, J. L. F. C., Matos, C. & Reis, S. (2000). Phenolic Acids and Derivatives; Studies on the Relationship among Structure, Radical Scavenging Activity and Physicochemical Parameters. *J. Agric. Food Chem*, 48: 2122-2126.
- Silva, S., Pinto, G., Dias, M. C., Correia, C. M., Moutinho-Pereira, J., Pinto-Carnide, O., and Santos, C. (2012). Aluminium long-term stress differently affects photosynthesis in rye genotypes. *Plant Physiology and Biochemistry*, 54, 105-112.
- Šimonovičová, M., Tamás, L., Huttová, J., and Mistrík, I. (2004). Effect of aluminium on oxidative stress related enzymes activities in barley roots. *Biologia Plantarum*, 48(2), 261-266.
- Singh, H. P., Batish, D. R., Kohli, R. K., and Arora, K. (2007). Arsenic-induced root growth inhibition in mung bean (*Phaseolus aureus* Roxb.) is due to oxidative stress resulting from enhanced lipid peroxidation. *Plant Growth Regulation*, 53, 65-73.
- Singh, S., Tripathi, D. K., Singh, S., Sharma, S., Dubey, N. K., Chauhan, D. K., and Vaculík, M. (2017). Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 177-193.
- Sipahi, H., Sayım, İ., Ergun, N. C. G., ve Cetin, G. (2010). Maltlık kalitesi yüksek arpa (*Hordeum vulgare* L.) çeşitlerinin geliştirilmesi (Biyoteknoloji iş paketi: İkiye katlanmış haploid bitkilerin üretilmesi). Tubitak Projeler.
- Smirnoff, N. (2000). Ascorbic acid: metabolism and functions of a multi-faceted molecule. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 3(3), 229-235.
- Smirnoff, N. (1993). The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New Phytologist*, 125(1), 27-58.
- Snowden, K. C., and Gardner, R. C. (1993). Five genes induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum* L.) roots. *Plant Physiology*, 103(3), 855-861.
- Song, H., Xu, X., Wang, H., and Tao, Y. (2011). Protein carbonylation in barley seedling roots caused by aluminum and proton toxicity is suppressed by salicylic acid. *Russian Journal of Plant Physiology*, 58(4), 653-659.
- Soydam Aydın, S., Gökçe, E., Büyük, İ., and Aras, S. (2012). Characterization of stress induced by copper and zinc on cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings by means of molecular and population parameters. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 746(1), 49-55.
- Steponkus, P. L. (1984). Role of the plasma membrane in freezing injury and cold acclimation. *Annual Review of Plant Physiology*, 35, 543-584.
- Summanen, J., Vuorela, P., Rauha, J. P., Tammela, P., Marjamäki, K., Pasternack, M., ... and Vuorela, H. (2001). Effect of simple aromatic compounds and flavonoids on Ca<sup>2+</sup> fluxes in rat pituitary GH4C1 Cells. *Eur. J. Pharmacol.*, 414(2-3), 125-133.
- Szarka, A., Horemans, N., Kovács, Z., Gróf, P., Mayer, M., and Bánhegyi, G. (2007). Dehydroascorbate reduction in plant mitochondria is coupled to the respiratory electron transfer chain. *Physiologia Plantarum*, 129(1), 225-232.

- Şenel, M. C., Gürbüz, M., ve Koç, E. (2015). Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler. *Mühendis ve Makine*, 56(669), 36-47.
- Tamás, L., Budíková, S., Huttová, J., Mistrík, I., Šimonovičová, M., and Široká, B. (2005). Aluminum-induced cell death of barley-root border cells is correlated with peroxidase and oxalate oxidase-mediated hydrogen peroxide production. *Plant Cell Reports*, 24, 189-194.
- Tamás, L., Šimonovičová, M., Huttová, J., and Mistrík, I. (2004). Aluminium stimulated hydrogen peroxide production of germinating barley seeds. *Environmental and Experimental Botany*, 51(3), 281-288.
- Taşçı, R., and Bayramoğlu, Z. (2020). Arpa üretim işleme ve pazarlama yapısının değerlendirilmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2988-2998.
- Thebaudin, J. Y., Lefebre, A. C., Harrington, M., and Bourgeois, C. M. (1997). Dietary fibres: Nutritional and technological interest. *Trends in Food Science & Technology*, 8(2), 41-48.
- Thome, O. W. (1885). *Hordeum vulgare* [Fotoğraf]. [https://www.pflanzen-deutschland.de/bilder/1313x1313/4407\\_ill\\_Pfl\\_prof\\_dr\\_otto\\_wilhelm\\_thome\\_flora\\_von\\_deutschland\\_oesterreich\\_und\\_der\\_schweiz\\_1885\\_gera\\_germany\\_hordeum\\_vulgare.jpg](https://www.pflanzen-deutschland.de/bilder/1313x1313/4407_ill_Pfl_prof_dr_otto_wilhelm_thome_flora_von_deutschland_oesterreich_und_der_schweiz_1885_gera_germany_hordeum_vulgare.jpg) adresinden 2024, 3 Haziranda alınmıştır.
- Thornton, F. C., Schaedle, M., and Raynal, D. L. (1986). Effect of aluminum on the growth of sugar maple in solution culture. *Canadian Journal of Forest Research*, 16:892-896.
- Tok, H. H. (1996). *Bitki besleme* (3. Baskı, pp. 109). Trakya Üniv. Tekirdağ Zir. Fak. Yayınları.
- Towill, L.E., and Mazur, P. (1975). Studies on the reduction of 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride as a viability assay for plant tissue cultures. *Canadian Journal of Botany*, 53(11),1097-1102.
- Trebst, A., Depka, B., and Holländer-Czytko, H. (2002). A specific role for tocopherol and of chemical singlet oxygen quenchers in the maintenance of photosystem II structure and function in *Chlamydomonas reinhardtii*. *FEBS Letters*, 516(1-3), 156- 160.
- TÜİK, (2022, 28 Ekim). Bitkisel Üretim 2. Tahmini. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-2.Tahmini-2022-45503>
- TÜİK, (2023). Türkiye İstatistik Kurumu. <https://www.tuik.gov.tr>
- USDA, (2023). The United States Department of Agriculture, Foreign Agriculture Service. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>
- Uysal, D. (2007). *Buğdayda, kök büyümesi ve antioksidatif enzim aktivitesi üzerinde alüminyum stresinin etkisi* [Yüksek lisans tezi]. Ondokuz Mayıs Üniversitesi.
- Van Breusegem, F., and Dat, J. F. (2006). Reactive oxygen species in plant cell death. *Plant Physiology*, 141(2), 384-390.
- Van Breusegem, F., Vranová, E., Dat, J. F., and Inzé, D. (2001). The role of active oxygen species in plant signal transduction. *Plant Science*, 161(3), 405-414.

- Vardar, F., and Ünal, M. (2007). Aluminum toxicity and resistance in higher plants. *Advances in Molecular Biology*, 1(1), 1-12.
- Vardar, F., Arıcan, E., and Gözükırmızı, N. (2006). Effects of Aluminum on in vitro root growth and seed germination of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Advances in Food Sciences*, 28(2), 85-88.
- Vardar, F., Çabuk, E., Aytürk, Ö., and Aydın, Y. (2016). Determination of aluminum induced programmed cell death characterized by DNA fragmentation in Gramineae species. *Caryologia*, 69(2), 111-115.
- Vardar, F., İsmailoğlu, I., İnan, D., and Ünal, M. (2011). Determination of stress responses induced by aluminum in maize (*Zea mays*). *Acta Biologica Hungarica*, 62(2), 156-170.
- Vardar, F., Yanık, F., Çetinbaş-Genç, A., and Kurtuluş, G. (2018). Aluminum-induced toxicity and programmed cell death in plants. *Advances in health and natural sciences* (pp. 155-182). Nova Science Publishers Inc.
- Verma, S., and Dubey, R. S. (2003). Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*, 164(4), 645-655. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00022-0).
- Vitorello, V. A., Capaldi, F. R., and Stefanuto, V. A. (2005). Recent advances in aluminum toxicity and resistance in higher plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 129-143.
- Von Uexkull, H., and Mutert, E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soil. (1995). *Plant and Soil*, 171(1), 1-15.
- Wang, J., Raman, H., Read, B., Zhou, M., Mendham, N., and Venkatanagappa, S. (2006a). Validation of an Alt locus for aluminium tolerance scored with eriochrome cyanine R staining method in barley cultivar Honen (*Hordeum vulgare* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*, 57(1), 113-118.
- Wang, J. P., Raman, H., Zhang, G. P., Mendham, N., and Zhou, M. X. (2006b). Aluminium tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.): physiological mechanisms, genetics and screening methods. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 7(10), 769-787.
- Wang, W., Zhao, X. Q., Chen, R. F., Dong, X. Y., Lan, P., Ma, J. F., and Shen, R. F. (2015). Altered cell wall properties are responsible for ammonium- reduced aluminium accumulation in rice roots. *Plant, Cell & Environment*, 38(7), 1382-1390.
- Wang, Y. S., and Yang, Z. M. (2005). Nitric oxide reduces aluminum toxicity by preventing oxidative stress in the roots of *Cassia tora* L. *Plant and Cell Physiology*, 46(12), 1915-1923.
- Widholm, J. M. (1972). The use fluorescein diacetate and phenosafranine for determining viability of cultured plant cells. *Stain Technology*, 47(4) 89-94.
- Wild, A. (1988). Soil acidity and alkalinity. In: Wild, A. (ed) *Russell's Soil Conditions and Plant Growth*, (pp. 844–889). Longman, Harlow.

- Winkler, S., Ockels, W., Budzikiewicz, H., Korth, H., and Pulverer, G. (1986). 2-Hydroxy-4-methoxy-5-methylpyridin-N-oxid, ein  $Al^{3+}$  bindender Metabolit von *Pseudomonas cepacia*. *Zeitschrift für Naturforschung C.*, 41(9-10), 807-808.
- Xiang, C., Werner, B. L., Christensen, E. L. M., and Oliver, D. J. (2001). The biological functions of glutathione revisited in *Arabidopsis* transgenic plants with altered glutathione levels. *Plant Physiology*, 126(2), 564-574.
- Yaashikaa, P. R., Priyanka, B., Senthil Kumar, P., Karishma, S., Jeevanantham, S., and Indraganti, S. (2022). A review on recent advancements in recovery of valuable and toxic metals from e-waste using bioleaching approach. *Chemosphere*, 287(Pt 2), 132230.
- Yalçın, G. (2016). *Arpa (Hordeum Vulgare L.) köklerinde alüminyum toksisitesine karşı salisilik asit uygulamasının etkileri* [Yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi.
- Yang, J. L., Li, Y. Y., Zhang, Y. J., Zhang, S. S., Wu, Y. R., Wu, P., and Zheng, S. J. (2008). Cell wall polysaccharides are specifically involved in the exclusion of aluminum from the rice root apex. *Plant Physiology*, 146(2), 602-611.
- Yang, J. L., You, J. F., Li, Y. Y., Wu, P., and Zheng, S. J. (2007). Magnesium enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane  $H^+$ -ATPase activity. *Plant & Cell Physiology*, 48(1), 66-73.
- Yang, Y. H., and Zhang, H. Y. (1998). Effect of citric acid on aluminum toxicity in the growth of mungbean seedlings. *Journal of Plant Nutrition*, 21(5), 1037-1044.
- Yang, J. L., Zhu, X. F., Peng, Y. X., Zheng, C., Li, G. X., Liu, Y., ... and Zheng, S. J. (2011). Cell wall hemicellulose contributes significantly to Al adsorption and root growth in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, pp-111.
- Yavaş, İ., ve İlker, E. (2011). Bitkilerde stres dayanıklılık mekanizmaları. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 17(3), 175-187.
- Yavaş, İ., ve İlker, E. (2020). Çevresel stres koşullarına maruz kalan bitkilerde fotosentez ve fitohormon seviyelerindeki değişiklikler. *Bahri Dağdaş Bitkisel Araştırma Dergisi*, 9(2), 295-311.
- Yin, H., Chen, Q., and Yi, M. (2008). Effects of short-term heat stress on oxidative damage and responses of antioxidant system in *Lilium longiflorum*. *Plant Growth Regulation*, 54, 45-54.
- Yürür, N. (1994). *Serin iklim tahılları* (7. Baskı, ss. 169-195), Uludağ Üniv. Yayınları.
- Zhang, H., Tan, Z. Q., Hu, L. Y., Wang, S. H., Luo, J. P., and Jones, R. L. (2010). Hydrogen sulfide alleviates aluminum toxicity in germinating wheat seedlings. *Journal of Integrative Plant Biology*, 52(6), 556-567.
- Zhang, J., He, Z., Tian, H., Zhu, G., and Peng, X. (2007). Identification of aluminium-responsive genes in rice cultivars with different aluminium sensitivities. *Journal of Experimental Botany*, 58(8), 2269-2278

- Zhang, H., Jiang, Z., Qin, R., Zhang, H., Zou, J., Jiang, W., and Liu, D. (2014). Accumulation and cellular toxicity of aluminum in seedling of *Pinus massoniana*. *BMC Plant Biology*, 14(1), 264.
- Zhao, X., Chen, Q., Wang, Y., Shen, Z., Shen, W., and Xu, X. (2017). Hydrogen-rich water induces aluminum tolerance in maize seedlings by enhancing antioxidant capacities and nutrient homeostasis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144, 369-379.
- Zhao, X. J., Sucoff, E., and Stadelmann, E. J. (1987).  $Al^{+3}$  and  $Ca^{+2}$  Alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells. *Plant Physiology*, 83(1), 159-162.



## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Merve YILMAZ KAÇAR

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Sakarya Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakülte, Biyoloji Bölümü
- **Yüksek Lisans** : Sakarya Üniversitesi, Biyoloji Ana Bilim Dalı, Bitki Fiziyojisi
- **Pedagojik formasyon:** 2013, Sakarya Üniversitesi, Hendek Eğitim Fakültesi

### MESLEKİ DENEYİM ve ÖDÜLLER

- 2015 yılında Milli Eğitim Bakanlığı'nda öğretmen olarak çalışmaya başladı ve halen çalışmaya devam etmekte.
- 2022 yılında Sakarya İl Milli Eğitim Müdürlüğü tarafından üstün başarı belgesi ve ödülünü almaya hak kazandı.
- 2017-2019 yılları arasında Sakarya İl Milli Eğitim Müdürlüğü tarafından kitap yazım komusyonunda 9 ve 11. sınıf fen lisesi biyoloji ders kitaplarının hazırlanmasında yazar olarak görevlendirildi.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Yılmaz, M. ve Doğru, A. (2014, 23-27, Haziran). Arpa Bitkisinde Alüminyum Toksisitesi Etkilerinin Araştırılması [Poster sunum]. 22. Ulusal Biyoloji Kongresi, Eskişehir, Türkiye.

### DİĞER ESERLER:

- Doğru, A. ve Yılmaz Kaçar, M. (2019). A preliminary study on salt tolerance of some barley genotypes. *Sakarya University Journal of Science*, 23(5), 755-762.
- Kabaoğlu, B., Aktaş, E., Demiray, F., Bozbey, F., Baştan, M. ve Yılmaz Kaçar, M. (2019). Fen Lisesi Biyoloji Ortaöğretim Ders Kitabı. (ISBN: 978-975-11-4942-8).