



**ALÜMİNYUM TOKSİSİTESİNE KARŞI BUĞDAY
MUTANT HATLARININ KARAKTERİZASYONU**

Seda MELİK

Danışman: Prof. Dr. Kamil HALİLOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı

2022

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TARLA BİTKİLERİ ANA BİLİM DALI

**ALÜMİNYUM TOKSİSİTESİNE KARŞI BUĞDAY MUTANT HATLARININ
KARAKTERİZASYONU**

(Characterization of Wheat Mutant Lines Against Aluminum Toxicity)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seda MELİK

Danışman: Prof. Dr. Kamil HALİLOĞLU

Erzurum
Ağustos, 2022



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

ALÜMİNYUM TOKSİSİTESİNE KARŞI BUĞDAY MUTANT HATLARININ
KARAKTERİZASYONU

Prof. Dr. Kamil Haliloğlu danışmanlığında, Seda MELİK tarafından hazırlanan bu çalışma, 23/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Tarla Bitkileri Anabilim Dalı Tahıllar ve Yemelik Baklagiller Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Kamil Haliloğlu <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Furkan Çoban <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Aras Türkoğlu <i>Necmettin Erbakan Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Kamil Haliloğlu danışmanlığında sunulan “Alüminyum toksisitesine karşı buğday mutant hatlarının karakterizasyonu” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	8	30
Kuramsal Temeller	10	30
Materyal ve Metot	29	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	8	20
Sonuçlar ve Öneriler	4	20
Tezin Geneli	14	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Seda Melik	Prof. Dr. Kamil Haliloğlu
25.8.2022	25.2.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan her sorun yaşadığımda yanına çekinmeden gidebildiğim, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Kamil HALİLOĞLU'na teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum. Çalışmamda yardımcı olan Dr.Öğr. Üyesi Mutlu YAĞANOĞLU'na, Arş.Gör. Hasan KOŞUNKARTAY'a, Yük. Zir. Müh. Sevda YAĞANOĞLU'na, Yük. Zir. Müh. İsmail ALSUDAN'a ve Zir. Müh. Emine ARAS'a teşekkür ederim.

Desteğiyle her zaman yanımda olduğu gibi bu çalışmamda da beni yalnız bırakmayan ve özverili yardımlarından dolayı sevgili kardeşim Abdulsamet MELİK'e, maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan aileme teşekkür ederim.

Seda MELİK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ ALÜMİNYUM TOKSİSİTESİNE KARŞI BUĞDAY MUTANT HATLARININ KARAKTERİZASYONU

Seda MELİK

Danışman: Prof. Dr. Kamil HALİLOĞLU

Amaç: Araştırmamızın içerisinde, farklı genotiplerin hidroponik sistemde yetiştirilip kök ve sürgün parametrelerine bakılmıştır. Ayrıca farklı $AlCl_3$ konsantrasyonlarına karşı tolerans seviyeleri incelenmiştir.

Yöntem: Çalışmamızda Kırık, Bezostaja, Demir 2000, İzgi 2001, Haymana 79 ve Mutant Hat ekmeklik buğday genotipleri materyal olarak kullanılmıştır. Çimlenme sonrasında belirli uzunluğa gelmiş olan fideler, Hoagland ve Arnon solüsyonu içerisinde farklı konsantrasyonların (0 mM, 10 mM, 20 mM, 30 mM, 40 mM) uygulanmasıyla hidroponik sistemde denemeye alınmıştır. 14 günlük sürecin sonunda kök sayısı, kök uzunluğu, sürgün uzunluğu, koleoptil uzunluğu, kök yaş ağırlığı, kök kuru ağırlığı, sürgün yaş ağırlığı, sürgün kuru ağırlığı ve hematoksilen boyama sonrası tolerans seviyeleri incelenmiştir.

Bulgular: Çalışmamızda elde verilerin varyans analiz sonuçları incelendiğinde, genotipler arasındaki farkın kök sayısı parametresinde önemli, kök uzunluğu, sürgün uzunluğu, koleoptil uzunluğu, çim uzunluğu, kök yaş ağırlığı ve sürgün yaş ağırlığı parametrelerinde çok önemli bulunmuştur. Dozlar arasındaki farkın koleoptil uzunluğu parametresinde önemli, kök sayısı, sürgün uzunluğu, çim uzunluğu, kök yaş ve sürgün yaş ağırlığı parametrelerinde çok önemli olduğu anlaşılmıştır. Genotip x doz interaksiyonunda ise farkın, sürgün uzunluğu parametresinde önemli, koleoptil uzunluğu parametresinde çok önemli bulunmuştur.

Sonuç: Bitki büyüme parametreleri içerisinde yer alan, kök sayısı, kök uzunluğu, sürgün uzunluğu, koleoptil uzunluğu, çim uzunluğu, kök ve sürgün yaş ağırlığı, kök ve sürgün kuru ağırlığı üzerine genotiplerin ve farklı alüminyum doz uygulamalarının etkisi önemli bulunmuştur. Alüminyum toksisitesi bitki büyüme ve gelişmesini olumsuz yönde etkileyen önemli faktörlerden biri olduğu doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Buğday, Hidroponik, Hematoksilen, Tolerans

Ağustos 2022, sayfa 64

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

CHARACTERIZATION OF WHEAT MUTANT LINES AGAINST ALUMINUM TOXICITY

Seda MELİK

Supervisor: Prof. Dr. Kamil HALILOĞLU

Purpose: Root and shoot parameters of different genotypes grown in the hydroponic system were examined. In addition, tolerance levels against different $AlCl_3$ concentrations were investigated.

Method: Seedlings of six wheat genotypes, which have reached a certain length after germination, were tested in the hydroponic system by applying different concentrations (0 mM, 10 mM, 20 mM, 30 mM, 40 mM) in Hoagland and Arnon solution. At the end of the 14-day period, root number, root length, shoot length, coleoptile length, root fresh weight, root dry weight, shoot fresh weight, shoot dry weight and tolerance levels after hematoxylin staining were investigated.

Findings: Based on variance analysis, differences among the genotypes were significant in root number parameter, and very important in the root length, shoot length, coleoptile length, grass length, root fresh weight and shoot fresh weight parameters. In addition, the difference among doses were significant in the coleoptile length parameter, and highly significant in the root number, shoot length, grass length, root age and shoot wet weight parameters. In genotype x dose interaction was significant in shoot length parameter and highly significant in coleoptile length parameter.

Results: The effects of genotypes and different aluminum doses were found to be significant on root number, root length, shoot length, coleoptile length, grass length, root and shoot fresh weight, root and shoot dry weight, which are among plant growth parameters. It has been confirmed that aluminum toxicity is one of the important factors negatively affecting plant growth and development.

Keywords: Aluminum, Wheat, Hidroponic, Hematoxylin, Tolerance

August 2022, 64 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	6
MATERYAL VE YÖNTEM	13
Materyal	13
Bitki materyali.....	13
Kullanılan kimyasallar, cihazlar ve malzemeler	13
Kullanılan kimyasal ve doz oranları	14
Buğday tohumlarının sterilizasyonu	14
Tohum çimlenmesi ve fide oluşumu	14
Hidroponik ortamın hazırlanması	15
Deneme düzeninin kurulması.....	15
Araştırmada incelenen parametreler	16
İstatiksel analiz.....	16
ARAŞTIRMA VE BULGULAR.....	18
Çimlenme Parametreleri Üzerine Alüminyum Düzeylerinin Etkisi	18
Kök Sayısı Üzerine Farklı Alüminyum Dozlarının Etkisi	19
Kök Uzunluğu Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi	20
Sürgün Uzunluğu Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi	25
Koleoptil Uzunluğu Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi.....	26
Çim Uzunluğu Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi	27
Kök Yaş Ağırlığı Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi	28
Sürgün Yaş Ağırlığı Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi	29

Sürgün Kuru Ağırlığı Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi	30
Kök Kuru Ağırlığı Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi	31
Hematoksilen boyama	32
TARTIŞMA	37
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	50



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Kimyasallar, Cihazlar ve Malzemeler	13
Tablo 2. Bezostaja, Demir 2000, Haymana 79, İzgi 2001, Kırık ve Mutan Hat Buğday Çeşitleri İçin Kullanılan Uygulamalar ve Doz Oranları	14
Tablo 3. Stok Hoagland ve Arnon Çözeltili Bileşenleri ve Miktarları.....	15
Tablo 4. Hidroponik Sistemde Kullanılacak Solüsyon Bileşenler.....	15
Tablo 5. Buğday Genotipleri Fidelerine Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Çimlenme İle İlgili Bazı Karakterlere Ait Varyans Analizi Sonuçları	18
Tablo 6. Buğday Genotipleri Fidelerine Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Çimlenme İle İlgili Bazı Karakterlere Ait Varyans Analizi Sonuçları	18
Tablo 7. Buğday Genotipleri Tohumlara Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Çimlenme İle İlgili Bazı Karakterlere Ait Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları.....	21
Tablo 8. Buğday Genotipleri Tohumlara Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Çimlenme İle İlgili Bazı Karakterlere Ait Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları.....	22
Tablo 9. Buğday Genotipleri (Kırık ve Mutant Hat) Fidelerine Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Köklere Uygulanan Hematoksilen Boyama Sonrası Ölçümlere Ait Varyans Analizi Sonuçları.....	32
Tablo 10. Buğday Genotipleri (Kırık ve Mutant Hat) Fidelerine Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Köklere Uygulanan Hematoksilen Boyama Sonrası Ölçümlere Ait Duncan Çoklu Karşılaştırma Analizi Sonuçları	32

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Alüminyumun doğadaki döngüsü	2
Şekil 2. Dünya topraklarının pH dağılımı	3
Şekil 3. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin kök sayısı üzerine etkileri.....	19
Şekil 4. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin kök uzunluğu üzerine etkileri	20
Şekil 5. Farklı alüminyum doz uygulanan genotiplere ait fide kök ve sürgün uzunluklarının görünümü. a) Bezostaja (0-10-20-30-40 mM), b) Demir 2000 (0-10-20-30-40 mM), c) Haymana 79 (0-10-20-30-40 mM)	23
Şekil 6. Farklı alüminyum doz uygulanan genotiplere ait fide kök ve sürgün uzunluklarının görünümü d) İzgi2001 (0-10-20-30-40 mM), e) Kırık (0-10-20-30-40 mM), f) Mutant hat (0-10-20-30-40 mM).....	24
Şekil 7. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin sürgün uzunluğu üzerine etkileri	25
Şekil 8. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin koleoptil uzunluğu üzerine etkileri	26
Şekil 9. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin çim uzunluğu üzerine etkileri.....	27
Şekil 10. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin kök yaş ağırlığı üzerine etkileri	28
Şekil 11. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin sürgün yaş ağırlığı üzerine etkileri	29
Şekil 12. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin sürgün kuru ağırlığı üzerine etkileri	30
Şekil 13. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin kök kuru ağırlığı üzerine etkileri	31
Şekil 14. Kontrol genotipe (Kırık) ait olan buğday fidelerine farklı konsantrasyonlarda alüminyum uygulaması sonrası kök ucunun hematoksilen boyama yöntemiyle boyanması görselleri (A)	33

Şekil 15. Kontrol genotipe (Kırık) ait olan buğday fidelerine farklı konsantrasyonlarda alüminyum uygulaması sonrası kök ucunun hematoksilen boyama yöntemiyle boyanması görselleri	34
Şekil 16. Mutant hatta ait olan buğday fidelerine farklı konsantrasyonlarda alüminyum uygulaması sonrası kök ucunun hematoksilen boyama yöntemiyle boyanması görselleri	35
Şekil 17. Mutant hatta ait olan buğday fidelerine farklı konsantrasyonlarda alüminyum uygulaması sonrası kök ucunun hematoksilen boyama yöntemiyle boyanması görselleri	36



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

%	: Yüzde
μM	: Mikromolar
μmol	: mikro mol
Al	: Alüminyum
$\text{Al}(\text{OH})_3$	: Hidroksi Alüminyum
AlCl_3	: Alüminyum klor
Altl	: Alüminyum tolerans lokusu
$\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	: hematoksilen
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	: Ethanol
Ca	: Kalsiyum
cm	: Santimetre
DNA	: Deoksiribo nükleik asit
Fe - EDTA	: Demir- Etilendiamin tetraasetik asit
g	: Gram
g/L	: Gram/litre
Ga	: Galyum
H_2O_2	: Hidrojen peroksit
H_3BO_3	: Borik asit
HCl	: Hidroklorik asit
In	: İndiyum
K	: Potasyum
KH_2PO_4	: Potasyum peroksit
KI	: Potasyum ionit
KNO_3	: Potasyum nitrat
KOH	: Potasyum hidroksit
Mg	: miligram
mL	: Mililitre
mM	: Milimolar
mm	: Milimetre
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	: Mangan (II) sülfat

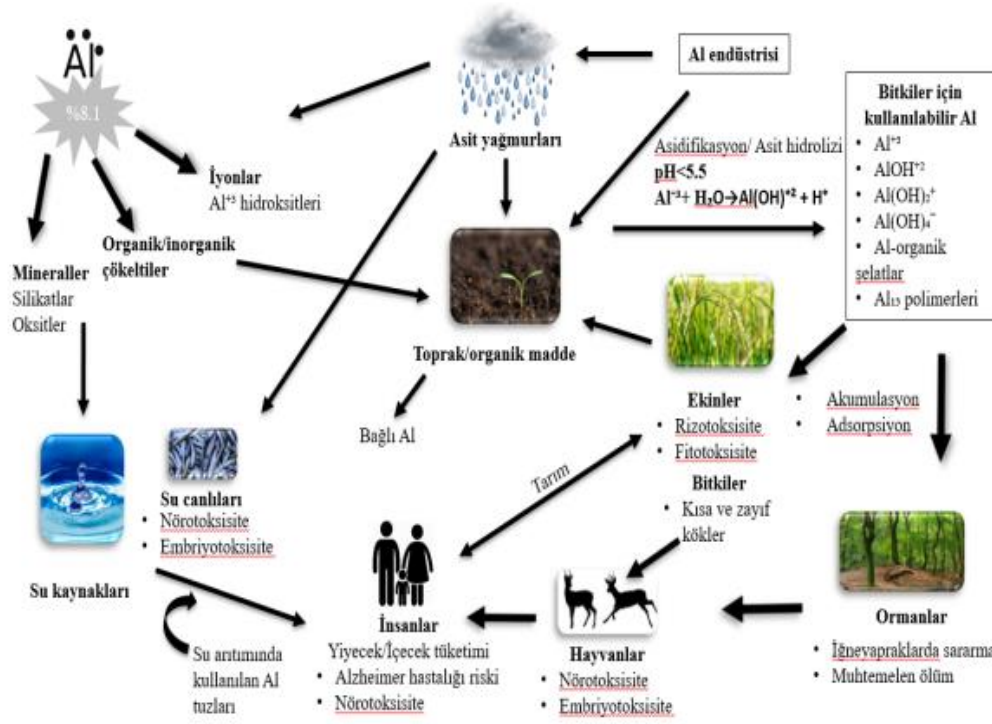
NaClO	: Sodyum kloroksit
O₂	: Oksijen
O₂	: Süperoksit anyonu
°C	: Santigrat derece
OH	: Hidroksil grup
P	: Fosfor
pH	: potansiyel hidrojen
ppm	: Milyonda bir kısım
ROS	: Reaktif oksijen türleri
S	: Kükürt
SD	: Standart Sapma
Si	: Silisyum
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
USDA	: Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı
NaMoO₄.2H₂O	: Sodyum molibdat dihidrat
(NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O	: Amonyum molibdat tetrahidrat
CuSO₄.5H₂O	: Bakır (II) sülfat
AlCl₃.6H₂O	: Alüminyum klorür hekzahidrat
MgSO₄. 7H₂O	: Magnezyum sülfat
ZnSO₄.7H₂O	: Çinko Sülfat Heptahidrat

GİRİŞ

Serin iklim tahılları içerisinde buğday, dünya nüfusunun gıda talebini temininde kullanılan kültür bitkileri arasında yeryüzünde yetiştiricilik ve üretim yönünden ilk sırada yer almaktadır. Buğday üretim miktarı, 2021 yılında bir önceki seneye göre %13,9 oranında azalarak 17,7 milyon ton olarak açıklanmıştır (TUİK 2021). Dünya buğday üretimi 2021-22 yılı sezonunda 778 milyon ton olarak rapor edilmiştir (USDA 2021/22). Bu doğrultuda buğday gerek ülkemizde gerekse tüm dünya ülkeleri için stratejik bir üründür. Buğday bitkisinin geniş bir adaptasyon kabiliyetine sahip olması, işlenmesinin kolay olması, taşınması ve muhafazasının kolay olması sebebiyle 50'den fazla ülkenin temel gıda kaynağını oluşturmaktadır (Anonim 2015a). Buğday, yalnız karbonhidrat bakımından değil, beslenme açısından önemli olan lifli maddeler, proteinler, vitaminler ve mineraller yönünden oldukça zengindir. Ülkelerin gelişmişlik seviyeleri ve tüketim alışkanlıklarına bağlı olarak beslenmede enerji ihtiyacının %15-70'ini temin eden yegâne kültür bitkisidir. Ülkemizde ve dünyada en fazla üretim alanı bulunan buğdayın çeşitli toprak tiplerinde ekimi ve üretimi yapılmaktadır.

Ağır metaller; alüminyum, arsenik, bakır, civa, çinko, kadmiyum, kobalt, krom, kurşun, molibden, nikel ve selenyum gibi elementleri içermektedir. Bu ağır metallerin mevcut durumlarındaki artışı tüm canlılara yaşam alanı olan toprağın kirlenmesine neden olmaktadır. Özellikle bitkisel üretim yapılan tarım arazilerinde bu kirlilik; büyüme ve gelişmeyi, fizyolojik aktiviteleri, bitki besin elementlerinin alımını olumsuz yönde etkilemektedir (Yağdı, et al., 2000).

Doğal olarak asiditesi yüksek olan toprakların %30-50'sinin yetiştiricilik yapılan tarım alanları olduğu belirtilmiştir (Kochian *et al.*, 2004). Alüminyum (Al), oksijen (O₂) ve silisyumdan (Si) sonra en çok bulunan üçüncü elementtir (Von Uexküll and Mutert, 1995). Alüminyum, asitli topraklarda bitki büyümesi ve üretkenliği için sınırlayıcı bir abiyotik faktördür. Alüminyum genellikle bitkiler için toksik olmayan oksitler ve alüminosilikatlar halinde bulunur. Ancak toprak pH'ı düştükçe (pH≤5), bitkiler tarafından kolayca alınabilen ve normal bitki büyüme mekanizmalarına müdahale edebilen toksik Al³⁺'ya dönüşür (Kochian, 1995; Ma *et al.* 2001).

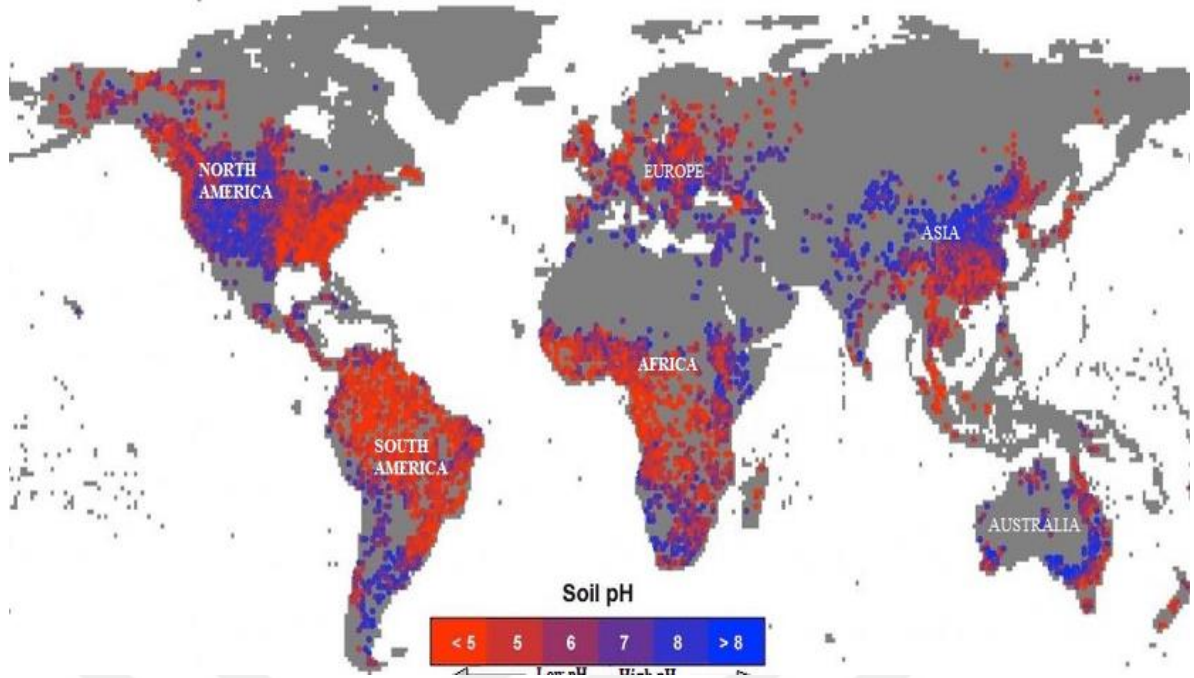


Şekil 1. Alüminyumun doğadaki döngüsü (Kurtuluş, 2019)

Asitli topraklarda, alüminyum toksisitesi, bazik katyonların (Ca^{2+} , Mg^{2+} ve K^+) kaybı ve artan çözünür Al^{3+} konsantrasyonu ve vazgeçilmez besin maddelerinin (özellikle fosfor, molibden ve magnezyum) sınırlı mevcudiyeti nedeniyle mahsul gelişimi ve üretkenliği için önemli bir sınırlayıcı faktördür (Li *et al.* 2016).

Asitli topraklarda yetişen bazı bitki türleri, alüminyum toksisitesinin üstesinden gelmek ve bunlara direnmek için tolerans mekanizmaları geliştirmiştir (Ma *et al.* 2001; Kochian *et al.* 2015). Bitkilerdeki bu alüminyum tolerans mekanizmaları, alüminyumu kök uçlarından uzaklaştırarak veya alüminyum iyonlarının içsel detoksifikasyonu ile alüminyumu detoksifiye ederek sert fitotoksosite koşulları altında büyümelerini daha güçlü hale getirmektedir (Kochian *et al.* 2005).

Bitkilerde alüminyum toleransı, organik asitleri içeren mekanizmalarla sağlanır (Klug and Horst, 2010; Ryan, 2018). Organik asitler, alüminyum iyonları ile hücre içinde veya kök ucunda stabil bir kompleks oluşturur (Ma *et al.* 2001). Alüminyumun hassas dokularla doğrudan temasını önleyen köklerden organik asitler salgılayabilen (Ryan *et al.* 1995) bir dizi alüminyum toleranslı bitki tanımlanmıştır.



Şekil 2. Dünya topraklarının pH dağılımı (Cohen, J.; Slessarev, 2016)

Buğday, pH değeri 6.5-8.7 aralığında olan topraklarda yetiştiriciliği yapılmasına rağmen pH değeri 7.0-7.7 arasında olan tarım arazilerinde daha iyi gelişme göstermektedir (Anonim 2022b). Dünya’da pH değeri 6.5’in altında olup, gıda ve bitkisel üretim potansiyeline sahip tarım arazilerinin %70’inde Al, bitki büyümesini sınırlandıran en önemli ağır metallerden biridir. Düşük pH seviyesi durumunda alüminyum ve magnezyum toksisitesi ortaya çıkar. Ayrıca çinko fosfor, kalsiyum, kükürt, nitrat, potasyum, ve molibden eksikliklerine sebep olduğu belirlenmiştir. Tarım arazilerinde meydana gelen bu olumsuz değişikliklerin insan beslenmesinde önemli yer tutan buğday üretimini de olumsuz yönde etkileyeceği düşünülmektedir.

Bitki kökleri, bitki su ve besin elementi alımında etkilidir. Kökün uzama bölgesi alüminyuma en duyarlı bölge olarak kabul edilmiştir (Li *et al.*, 2016). Bitki köklerinin maruz kaldıkları mikromolar (μm) konsantrasyonlardaki alüminyum (Al) iyonları, yaklaşık 30 dakika içerisinde bitki büyümesini engellediği ve bitki fonksiyon bozukluğuna neden olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Alüminyuma maruz kalma, buğday, arpa ve mısır gibi çeşitli bitki türlerinin kök uçlarındaki mitotik aktiviteyi önemli ölçüde azaltmıştır. Alüminyum (Al) toksisitenin en önemli belirtisi kök büyümesini inhibe etmesidir. Alüminyum (Al), bitki köklerinin gelişimini ve toprakta ilerleyişini olumsuz etkilediğinden, bitki besin elementleri ile su alımı bozulur, bunun neticesinde bitki gelişiminin zayıflamasına neden olur (Blarney *et al.*, 2004; Ma, 2005).

Bitkilerin büyüme ve gelişmelerinin zayıflaması ve hücresel işlevlerinin olumsuz etkilenmesi neticesinde yetiştiriciliği yapılan ürünlerin üretkenlikleri ve niteliklerinde düşüş

ortaya çıkar. pH'ı düşük olan alanlar ekseriyetle tarımsal üretiminin kritik olduğu Güney Amerika, Orta Afrika, Güneydoğu Asya gibi az gelişmiş ülkelerde yer almaktadır (Vitorello *et al.*, 2005). Ülkemizde ise toprak yapısı doğal olarak asiditesi yüksek olan bölgemiz Karadeniz Bölgesi'dir. Yetiştiricilik yapılabilecek tarım arazilerinin pH seviyesinin düşük olması, dünyada bilhassa yaygın olan hububat üretimini negatif yönde etkilemektedir (Silva *et al.*, 2018).

Toprağın doğal olarak düşük pH'a sahip olmasının yanında çevresel faktörler ve endüstriyel faaliyetler nedeniyle sonradan asidik hale geçtiği durumlar da vardır. Birçok sebepten dolayı toprakta biriken alüminyum bitkilere ve diğer canlılara olumsuz etki etmektedir. Tarım arazilerinde toprağın asitlik durumu üstten kireçleme ile bir nebze iyileştirilebildiği halde, bu çözüm iktisadi olarak çok maliyetli olduğu gibi iş gücü bakımından da yetersizdir. Üstten kireçlenmeye tabi tutulan toprakta kireç, toprağın alt katmanlarına çok yavaş inmektedir. Bununla beraber toprağa aşırı kireç uygulanması bitki büyüme ve gelişiminde temel olumsuz neticelere ve diğer bitki besin elementlerinin alımında eksikliklere yol açabilmektedir (Wang *et al.*, 2006). Düşük pH'a sahip toprakların iyileştirilip daha uygun hale getirilmesi veya dayanıklı çeşit geliştirilmesi bitki gelişimi için gerekli olan bitki besin elementlerinin alınmasını sağlamak, verim ve kaliteyi artırmak açısından önemlidir.

Uzun süre alüminyum (Al) içeren asidik topraklarda yetişen bitkilerin hücre yapı ve fonksiyonlarındaki meydana gelen olumsuz değişiklikler, alüminyum (Al) toksisitesini ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeple buğdayda asiditesi yüksek olan topraklarda bulunan alüminyum stresine karşı toleranslı çeşit/çeşitlerin geliştirilmesi ve tolerans seviyesi derecelerinin belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Günümüze kadar gelen ıslahçılar tarafından gerek uzun yıllar süren gerek laboratuvar koşullarında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen üstün özelliklere sahip çeşitlerin geliştirilmesi uluslararası düzeyde üretim için önemli yer tutmaktadır.

Tarımsal üretim yapılan ürünlerin iyileştirilip geliştirilmesi için birçok ıslah yönteminden istifade edilmektedir. Uygulanan ıslah yöntemleri çeşit getirme (introdüksiyon), seleksiyon, mutasyon, melezleme ve genetik modifikasyon olarak sıralanmaktadır. Bu bitki ıslahı yöntemleriyle her geçen gün yeni özellikler taşıyan çeşitlerde verim ve kalite artışına katkıda bulunmaktadır.

Klasik ıslah yöntemleri içerisinde mutasyon ıslahı genetik varyabilite oluşturmada etkin olarak kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda alüminyum stresine toleranslı çeşit elde etmek için buğday tohumları sodyum azid ile kimyasal mutasyona tabi tutulmuştur. Elde edilen mutant popülasyon içerisinde alüminyum toksisitesine toleransı olan mutant bitkiler çimlenme

aşamasında belirlenmiştir (Pour, 2016). Bu çalışmada alüminyuma toleranslı mutant bitkiler ile beraber 5 adet buğday çeşidi hidroponik sistem yetiştirme ortamında, farklı dozlarda uygulanan alüminyuma karşı gösterdikleri tolerans seviyeleri belirlenmiştir.

Bu araştırmada, dayanıklılık geliştirme yönünde yapılacak çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Bu araştırmanın temel amacı, alüminyuma toleranslı iki çeşit (Demir 2000 ve Işgi 2001), iki adet hassas çeşit (Bezostaja ve Haymana 79), kontrol çeşit (Kırık) ekmeklik buğday (*Triticum aestivum* L.) çeşitleri ve Mutant hatların farklı alüminyum konsantrasyonlarına karşı verdiği tepkilerin belirlenmesidir. Alüminyum stresine karşı tolerans seviyelerinin belirlenmesi bitki ıslahı çalışmaları ile ön aşamayı oluşturmaktadır.



KURAMSAL TEMELLER

Buğday, insan gıdası ve hayvan yemi için kullanılan önemli bir üründür. Sahip olduğu geniş adaptasyon yeteneği sayesinde her türlü iklimde ve yörede yetiştirilebilme üstünlüğüne sahiptir. Ayrıca buğday insan beslenmesine esansiyel amino asitler, mineraller ve vitaminler ile faydalı fitokimyasallar ve diyet lifi bileşenlerine de katkıda bulunur ve bunlar özellikle tam tahıllı ürünler açısından zengindir. Dünyanın her yerinde rahatlıkla yetişebilmesi, tarımın kolay ve makinaya dayalı oluşu, taşıma ve depolanmasının kolaylığı, ucuz ve kaliteli bir besin kaynağı oluşu, dünya nüfusunun artışının karşısında buğday giderek “stratejik” bir nitelik kazanmaktadır (Akkaya, 1994; Shewry, 2009).

Uzun yıllar süre gelen ıslah ve seleksiyon çalışmalarıyla buğday çeşitleri geliştirilmiştir. Genetik yapılarına ait özelliklerin büyük bir kısmı, yüzlerce yıllık doğal ıslah ve doğal seleksiyon olaylarını göstermektedir. Bu nedenle yabani formlarında olduğu gibi, kültüre alınmış buğday genotipleri de, bir tür olarak hayatlarını devam ettirebilecek şekilde bir genetik programlamaya sahiptirler. Bu programlamanın esası, türün diğer bitkilerle rekabete girebilecek kadar bitki meydana getirebilmek için gerekli olan tohumun üretilmesidir. *Triticum* cinsine giren bütün buğdaylar, Gramineae (buğdaygiller) familyası içerisinde en önemli türleri oluştururlar. *Triticum* cinsi, günümüzdeki buğday çeşitlerinin kökenini oluşturan yabani ve primitif buğdayların yer aldığı çok sayıda tür ve alttürle sahiptir. Buğdayın kromozom yapısı konusunda yapılan önemli araştırmalar ve bu yönde sağlanan büyük başarılar, buğdayların kökenine ait açıklamaların yapılması bakımından kuşkusuz büyük yararlar sağlamıştır (Akkaya, 1994).

Buğdayın genetik yapısı önemlidir, çünkü tüm kalite özellikleri genlerin ifadesinden ve çevre ile etkileşimlerinden kaynaklanır (Morris and Rose, 1996). Kromozomlar, hücrelerce DNA’ları kapsayan bireysel paketlerdir. Yüksek formu bitki ve hayvanlar her hücrede iki kromozom setine sahip olup, bu setlerden biri anaya diğeri babaya ait karakterlerle donatılmıştır. Normal iki kromozom setine sahip olan bir bitki diploid olarak tanımlanır. Buğdaylar bu bakımdan üç gruba ayrılırlar. Birinci grup iki kromozom setine sahip diploit, ikinci grup dört kromozom setine sahip olan tetraploid, üçüncü grup ve en önemli grup altı kromozom setine sahip olan hexaploid gruptur (Akkaya, 1994).

Buğdayın allopoliploid doğası önemlidir, çünkü homoeolog kromozom grupları (A, B ve D) oldukça ilişkilidir ve benzer genetik özelliklere sahiptir (Morris, and Rose, 1996). Günümüzde tarımı yapılan ekmeklik (*Triticum aestivum* (AA BB DD)) ve topbaş buğdaylar hexaploid, makarnalık buğdaylar ise tetraploid grubuna girerler. Temel kromozom sayısı 7 olan buğday, diploid buğdaylar 14 ($2n=2 \times 7=14$), tetraploid buğdaylar 28 ($2n=4 \times 7=28$), hexaploid buğdaylar 42 ($2n=6 \times 7=42$) kromozom olmak üzere üç grupta ele alınır. Hexaploid buğdayın her bir hücresinde 17 milyar temel DNA çifti bulunmaktadır. Bu sayı buğday bitkisinin genetik yapısının son derece kompleks olduğunu göstermektedir. Buğday bitkisi bu mükemmel genetik yapısı sayesinde, kuzey ve güney yarım kürenin bütün enlemlerinde yetişebilmektedir (Akkaya, 1994).

Bitkilerdeki büyüme ve gelişme olayları, içsel ve dışsal faktörlerin kontrolü altındadır. Büyüme ve gelişme ancak uygun çevresel koşullar altında normal seyrinde gerçekleşebilir. Çevresel koşullarda meydana gelen her değişim, bitki büyüme ve gelişmesini de belirli oranda etkilemekte ve stres kavramını ortaya çıkarmaktadır. Cassels ve Curry (2001) stresi, “fizyolojik değişimlere, bedensel zararlara ve hastalıklara neden olma kapasitesine sahip olan biyotik veya abiyotik faktörler” olarak tanımlamıştır. Stres faktörleri, tarımsal verimliliği azalttığı gibi, yeni arazilerin tarımsal faaliyetler amacıyla kullanımını da kısıtlayan veya engelleyen bir etkidir. Bitki türlerinin stres faktörlerine verdikleri morfolojik, anatomik ve metabolik cevaplar evrim sürecindeki doğal seleksiyonun ortaya çıkmasına neden olmuştur (Gaspar *et al.* 2002).

Ağır metal stresi, toprağa karışan atık maddeler yüzünden, su kaynakları giderek daha fazla kirlenmektedir. Ağır metallerin oluşturduğu kirlilik geniş vadede önemli sorunlara neden olmaktadır. Organizmalarda birikerek besin zincirinde yer almakta ve zararlarını yıllarca sürdürmektedirler. Çinko, kurşun, nikel, kobalt, krom, bakır, mangan, kadmiyum, selenyum, arsenik ve alüminyum gibi metaller toprakta belirli bir miktarı aştıklarında zehir etkisi yapan kirleticilerdir. Bunların birçoğu belirli bir miktarda bitkiler için hayati öneme sahip olsalar da fazla miktarda bulunmaları birçok zarara yol açmaktadır. Genellikle elektron aktarımında devreye girerek solunum ve fotosentez üzerine olumsuz etki yaparlar. Hayati öneme sahip enzimleri inhibe ederek çalışmalarını engellerler. Böylece bitkilerin enerji üretme ve kaliteli ürün oluşturma yetenekleri azaltılır (Anonim 2022c).

Sanayileşmesinin artması tarımsal üretkenliğe olağanüstü bir olumsuzluk getirmiş ve bu olumsuzluk çevresel maliyetleride beraberinde getirmiştir. Sanayileşmenin en büyük talihsiz sonuçlarından biri toprak asitlenmesi olduğu belirtilmiştir. Toprak asitlenmesi, dünya çapında tarımsal üretimde ve ekolojik istikrarda artış gösteren önemli bir sorundur (Zhao *et al.* 2014). Asiditesi yüksek topraklarda zayıf bitki gelişmesi, proton toksisitesi, azot, fosfor, kalsiyum,

magnezyum eksiklikleri, alüminyum, manganez ve demir gibi çeşitli metallerin toksisiteleri dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden kaynaklanır. Alüminyumun toksik formlarının toprak içerisinde çözülmesi toprağın asitlenmeye ($\text{pH} < 5$) başlamasıyla gerçekleşir (Dai *et al.* 2009; Rahman, R., and Upadhyaya, H., 2021). Alüminyum toksisitesinin ortaya çıkması, asiditesi yüksek topraklarda alüminyum ile birlikte bulunan diğer birçok faktöre bağlıdır. Alüminyum ile bu tür faktörler arasındaki etkileşimler, arazi şartlarında bitkiler için alüminyum toksisitesinin önemli belirleyicileridir (Zhao *et al.* 2014).

Alüminyum, dış kabukta üç elektrona sahip alüminyum, galyum, İndiyum ve talyumdan oluşan Grup III Elementlerinden biridir. Daha büyük boyutları ve daha küçük iyonlaşma potansiyelleri nedeniyle alüminyum, ayrıca Ga, In ve Tl, dış kabuğunda üç elektronu da bulunan B'den çok daha metalik ve iyoniktir. Bu özelliklerdeki fark, B'nin Grup III'teki diğer dört elementten ayrılmasını haklı çıkarmak için kullanılmıştır. Elementel alüminyum kesinlikle metalik olmasına rağmen, bileşiklerinde hala hem İyonik hem de kovalent karakter sergiler. Tek değerli durum bir dereceye kadar Grup III elementlerinde meydana gelir, ancak oluşum sırası: $\text{Tl} > \text{In} > \text{Ga} > \text{Al}$ 'dır. Bu nedenle, dört elementin tümü için baskın olan üç değerlikli durum, özellikle Alüminyum durumunda yaygındır. (McLean, 1976)

Toprakta kimyasal olarak aktif olan alüminyum, toprağın pH'ı ve mineralojik bileşimi tarafından kontrol edilen çeşitli biçimlere sahip olabilir. Alüminyum, elektrostatik kuvvetlerle negatif yüklü kil yüzeylere bağlanabilir ve bu nedenle Ca^{2+} , Mg^{2+} veya K^{+} gibi diğer katyonlarla serbestçe değişebilir (Barnhisel and Bertsch, 1983). Alüminyum (Al) stresi, asidik topraklarda bitki büyümesini ve gelişmesini engelleyen başlıca sınırlamalardan biridir (Foy 1988, Taylor 1988; Kochian 1995; Zhao *et al.* 2014; Rahman, *et al.* 2018; Liu *et al.* 2018; Santos *et al.* 2019; Yan *et al.* 2022). Alüminyum toksisitesi, yeryüzündeki potansiyel olarak tarımsal üretim yapılabilecek arazilerin yaklaşık %50'sini oluşturan ve türlere bağlı olarak %25 ile %80 arasında verim kayıplarına neden olmaktadır. Alüminyum stresi sorunu, suni gübrelerin kullanılmasıyla ve asit yağmurlarının artmasıyla daha da ağırlaştığı tespit edilmiştir (Sade *et al.* 2016).

Bitkilerin kök ucu, alüminyum toksisitesinin ana algılama bölgesidir. Alüminyum stresli buğdayın birincil köklerinde, alüminyum birikimi ve plazma zarı bütünlüğü kaybı, kök ucunda en yüksek olduğu ve kök eksenini boyunca azalma görüldüğü belirtilmiştir. (Liu *et al.* 2018). Toprakta mikromolar konsantrasyonlarda bulunan alüminyum kök apeksi hücrelerine girerek bitkinin kök gelişimini engeller ve diğer birçok metabolik ve fizyolojik fonksiyonun denatürasyonuna neden olur. Kök gelişiminin engellenmesi, bitkilerde alüminyum toksisitesinin en önemli belirtisidir. Bitkiler, alüminyumun toksik etkileriyle başa çıkmak için,

dahili tolerans mekanizması ve dışlama mekanizmasını içeren çeşitli mekanizmalara sahiptir (Rahman and Upadhyaya, 2021). Alüminyum (Al), pH < 5.5 olan asidik topraklarda konjuge organik ve inorganik iyonlar şeklinde çöker. Toprak içerisinde çözünen Al içeren mineraller, diğer besinlerle birlikte alındığında bitkilerde çeşitli olumsuz etkilere neden olur (Chauhan *et al.* 2021). Yüksek mineral içeriğine sahip asitli topraklarda alüminyum, fitotoksitesinin başlıca nedenidir. Alüminyum toksisitesinin temel hedefi, alüminyum maruziyetinin hücre uzamasının ve hücre bölünmesinin inhibisyonuna neden olduğu kök ucudur, bunun sonucunda besin maddeleri ve su alımının azalmasıyla birlikte kök bodurluğuna yol açar (Rahman *et al.* 2018).

Asitli topraklarda mineral beslenme alüminyum toksisitesini hafifletmek için önemli bir yere sahiptir. Asiditesi yüksek topraklara fosforun (P) verilmesi, fosfor eksikliği yaşayan ve alüminyumun toksisitesine maruz kalan bitkiler için faydalı olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda fosfor ilavesi, kök solunumunu, klorofil içeriğini, bitki gelişimini ve kuru madde verimini arttırdığı belirtilmiştir. Mineral beslenme periyodu içerisine katılan diğer elementler; Kalsiyum (Ca) değişikliği (kireçleme), toprak asitliğini düzeltmek ve alüminyum toksisitesini azaltmak için etkilidir. Magnezyum (Mg), kök uçlarında bulunan sitozolik plazma zarından alüminyum göçünü önleyebilir. Sülfür (S), alüminyum dahil olmak üzere birçok metal toksisitesini hafifleten çok yönlü bir element olarak kabul edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, silisyum (Si) ve endüstriyel yan ürünler, hormonlar, organik asitler, poliaminler, biyogübreler ve biyokömürler gibi diğer bileşenlerin, bitkilerde alüminyum toksisitesini azaltmak için umut verici rol oynadıkları belirtilmiştir (Rahman *et al.* 2018).

Toprakta mikromolar düzeyde bulunan Al konsantrasyonu, aşağıdakiler gibi birkaç geri dönüşü olmayan toksisite semptomlarını indüklemek için yeterlidir. Süperoksit anyonu (O₂), hidrojen peroksit (H₂O₂) ve hidroksil radikali (OH) gibi reaktif oksijen türlerinin (ROS) hızlı ve geçici aşırı üretimi, oksidatif patlamalara neden olur (Chauhan *et al.* 2021). Bitkiler doğal olarak şiddetli Al fitotoksisite koşullarıyla mücadele için çeşitli tolerans mekanizmaları geliştirmiştir ve organik asitlerin salınımı bunlardan biridir (Kochian *et al.* 2015). Raporlar, Al stresi sırasında buğday köklerinin etrafında malat salgılandığını göstermiştir (Yang *et al.* 2011). Daha sonra arpa (Xu *et al.* 2015), domates (Sasaki *et al.*, 2016), pirinç (Liu *et al.* 2017) ve lahana (Zhang, *et al.*, 2017) gibi monokotiledon ve dikotiledonlarda organik asit salgısı bulunmuştur.

Buğday kökleri tarafından salınan malat miktarının, rizosfer ortamındaki Al³⁺ (0-200 mmol/L) konsantrasyonu ile doğru orantılı olduğu (Ryan *et al.*, 1995) ve alüminyum ile malat salınımının azaldığı rizosferden uzaklaştırıldığı bildirilmiştir (Silva *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2017). Ayrıca Alüminyum'un diğer formları (poli-Al (Al₁₃), hidroksi Al (Al(OH)₃) gibi), ağır

metaller ve pH değerlerindeki değişimler malat salınımını tetiklemediğini belirtmişlerdir. Kök uçlarındaki organik asit anyonunun salgılanma mekanizmasının rizosfere nüfuz ettiğini ve rizosferdeki alüminyum'u şelatladığını ve bunun neticesinde alüminyum'un kök ucuna girmesini engellediğini belirtmişlerdir (Kichigina *et al.* 2017; Sasaki *et al.* 2016; Silva *et al.* 2018). Alüminyum'a maruz kalan her bitkinin salgıladığı organik asit türü ve organik asit salgılama zamanı bitki türlerine göre farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir (Kichigina *et al.* 2017; Sasaki *et al.* 2016; Silva *et al.* 2018). Alüminyum ile farklı organik asitlerin şelatlama yeteneği sitrat > oksalat > malattır (Brunner and Sperisen, 2013). Organik asit salgısı, Alüminyum stresi sırasında salgılanma süresi ve hızına göre iki farklı modelde sınıflandırılabilir: Model-I; kök ucu, bitkiyi kısa sürede korumak için hücre zarındaki iyon kanallarını hızla aktive ederek organik asidi salgılar (Ma *et al.* 2001; Zheng *et al.* 2005) ve salgılanan organik asit oranında belirgin bir değişiklik yoktur. Alüminyum maruziyeti sırasında organik asit salgılanması buğday ve karabuğday köklerinden Alüminyumla aktive olan organik asit salgısı Model-I ile gerçekleşir (Lin *et al.* 2015). Model-II açısından, Alüminyum stresinden sonra kök ucundan organik asitlerin salgılanması birkaç saat (4-10 saat, bazen 100 saate kadar) sürerken, yani organik asitlerin salgılanmasının belirgin bir gecikmesi vardır ve salgılama hızı belirli bir dönemde zamanla artar (Riaz *et al.* 2018).

Yapılan bu araştırmada, besin solüsyonunda 100 µM alüminyum'a 4 saat maruz kaldıktan sonra, alüminyum'a duyarlı genotipler, alüminyum'a toleranslı genotip türlerine göre kök uçlarında daha fazla alüminyum biriktirdiği ve farklılıkların zamanla daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir. X-ışını mikroyanalizi ile dondurularak kurutulmuş kök uçlarının analizi, alüminyum'un, alüminyum'a duyarlı bitkilerin kök uçlarına girdiğini ve epidermal katmanda ve epidermisin hemen altındaki kortikal katmanda biriktiği gösterilmiştir. Hassas apekslerin uzun süreli alüminyuma'a (24 saat) maruz kalması, K'nin yokluğuyla çakışan bir alüminyum dağılımı ile sonuçlandığı belirtilmiştir. Kortikal tabakadaki alüminyum miktarının belirlenmesi, hassas apekslerin, eşdeğer süreler boyunca Alüminyum solüsyonlarına maruz kalan toleranslı apekslerden 5-10 kat daha fazla alüminyum biriktirdiğini göstermiştir. (Delhaize, *et al.* 1993).

Bu çalışmada, alüminyum tolerans lokusunda (Alt1) Alüminyum toleransında farklılık gösteren Al toleranslı izogenik buğday (*Triticum aestivum* L.) hatlarında organik asitlerin verimdeki rolü araştırılmıştır. Besin solüsyonlarına alüminyum eklenmesi, buğday fidelerinin köklerinden malik ve süksinik asitlerin atılımını uyardığı ve alüminyum'a toleranslı genotiplerin, alüminyum'a duyarlı genotiplerden 5 ila 10 kat daha fazla malik asit salgıladığı belirtilmiştir. Fidelerde 200 µM alüminyum'a 15 dakika maruz kaldıktan sonra malik asit atılımı saptanılmış ve atılan miktarın, 24 saat boyunca lineer olarak arttığı belirtilmiştir.

Alüminyum konsantrasyonuna bağlı olarak atılan malik asit miktarının değişim gösterdiği ve 10 μM alüminyum konsantrasyonunda daha az atılım olduğu belirtilmiştir. Besin solüsyonlarına eklenen malik asit, alüminyum'a duyarlı fideleri fitotoksik alüminyum konsantrasyonlarından koruduğu belirtilmiştir. Atılan malik asidin birincil kaynağının kök apeksleri (terminal 3-5 mm kök) olduğu belirtilmiştir. Alüminyuma toleranslı ve alüminyuma duyarlı fidelerin kök uçları, 200 μM Al'ye 2 saatlik bir maruziyetten önce ve sonra benzer miktarlarda malik asit içerdiği belirtilmiştir. Bu uygulama sırasında, Alüminyum'a toleranslı fideler, başlangıçta kök uçlarında bulunan toplam malik asit miktarının yaklaşık dört katını salgıladığı, bu da sürekli malik asit sentezinin meydana geldiği belirtilmiştir. Alüminyum toleransı için ayrılan bir fide popülasyonunda alüminyum tarafından uyarılan yüksek malik asit atılımı oranları ile alüminyum toleransı arasında tutarlı bir korelasyon olduğu belirtilmiştir. Bu veriler, buğdaydaki Altı lokusunun alüminyum ile uyarılan malik asit atılımına dayalı bir Al tolerans mekanizmasını kodladığı hipotezi ile tutarlı olduğunu belirtmişlerdir (Delhaize, *et al.* 1993).

Yapılan bu çalışma, iki konsantrasyon 0 μM (kontrol) ve 100 μM ve beş çeşit; Kanchan, Shatabdi, Sourav, Bijoy (BARI-23) ve Sufi (BARI-22)den oluşmaktadır. Yetiştirilen beş genotipe ait fidelerin hidroponik kültür ortamında deneyleri yapılmıştır. Deneme, iki faktörlü tamamen tesadüf denemeleri deseninde üç tekrarlamalı olarak kurulmuştur. 100 μM konsantrasyon alüminyum uygulamasının, buğdayda hipokotil ve epikotil uzunluğu, çimlenme yüzdeleri ve kök sürgün uzunluğu, yaş ve kuru ağırlıkları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak bitkilerin, çimlenme yüzdesinin, hipokotillerin ve epikotillerin uzunluğunun, kök ve sürgün uzunluğunun, yaprak uzunluğunun, yaprak kılıf uzunluğunun, bitki boyunun, yaş ve kuru ağırlıklarının alüminyum stres koşullarına göre kontrolde daha fazla olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, buğday fidelerinin alüminyum stresine duyarlı olduğunu ve bununla birlikte, genotipler arasında, Shatabdi ve ardından Kanchan'da alüminyum stresi altında kuru kütlede minimum azalma gösterdiği belirtilmiştir. Alüminyum stresine daha duyarlı olan Shatabdi'nin alüminyum stresine Sourav, Bijoy (BARI-23) ve Sufi (BARI-22) gibi diğer genotiplere göre daha toleranslı olduğunu belirtmişlerdir (Sarker *et al.* 2019).

Yapılan bu çalışmada, yüksek verimli buğday (*Triticum aestivum* L.) genotiplerin tohum çimlenmesi üzerine farklı konsantrasyonlardaki alüminyumun (Al^{3+}) etkileri araştırılmıştır. 500 ppm konsantrasyonundaki alüminyum'un tohum çimlenmesi, fide büyümesi ve kuru maddesi üzerinde engelleyici etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Alüminyuma'a maruz bırakılan çeşitler arasında Sonlika, Fang-60'ta nispeten daha yüksek kök

ve sürgün kuru maddesi ve Baw-923 ve Protiva'da daha düşük bulunduğu belirtilmiştir. Fang-60'ın kök büyümesi ve Akbar, Gourab ve Protiva hariç hepsinin sürgün büyümesi düşük konsantrasyonda (10 ppm) uyarılmıştır. Al^{3+} toksisitesi, kök büyümesi ve gelişiminin düzenleyici sürecine müdahale ederek bitki büyümesini engellediğı (Foy 1988; Taylor 1988; Kochian 1995) için kök büyümesi, Al^{3+} stresine sürgünden daha duyarlı olduğu belirtilmiştir. Durumun üstesinden gelmek için Al^{3+} toleranslı buğday germplazmı, asitli toprak alanlarında ekiminin genişletilmesine yardımcı olacağı söylenmiştir (Alamgir and Akhter 2009).

Bitki türleri, alüminyum'u hem dahili hem de harici olarak detoksifiye etmek ve tolere etmek için geliştirilmiş direnç mekanizmalarına sahip olan bu abiyotik strese tepkilerinde farklılık gösterir. Çaet alar (*Secale cereale* L.), üreme amaçları için değerli bir genetik altyapıya sahip en Al-toleranslı tahıllardan biridir. Yabani akrabalar (*Secale* spp.), bu özellik ile ilgili yeni gen kaynakları sağlayabildiklerinde büyük önem taşırlar. Kültür ve yabani çaet alarda histokimyasal kök boyama yöntemleri ile Al toleransı/toksisitesi ile ilişkili olabilecek farklı hücrel bozukluklar gözlemlenmiş ve bir korelasyon bulunduğu belirtilmiştir (Santos *et al.* 2019).

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Bitki materyali

Araştırmamız, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesinden temin edilen alüminyuma toleranslı iki genotip (Demir 2000 ve Işgi 2001), iki adet hassas genotip (Bezostaja ve Haymana 79), kontrol genotip (Kırık) ekmeklik buğday (*Triticum aestivum L.*) genotipleri ve Mutant hatlar kullanılmıştır (Aydın 2014). Her bir tekerrürde 5 adet olmak üzere toplam 600 adet 6 tane ekmeklik buğday genotiplerine ait fideler kullanılmıştır.

Kullanılan kimyasallar, cihazlar ve malzemeler

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Kimyasallar, Cihazlar ve Malzemeler

Sıra	Kimyasallar	Malzemeler	Cihazlar
1	Saf Su	Çimlendirme Kağıdı	Saf Su Cihazı
2	NaClO (%30)	Petri Kapları	Hassas Terazı
3	C ₂ H ₅ OH (%70)	Cam Kavanoz	Manyetik Karıştırıcı
4	KNO ₃	Falkon Tüp	pH-metre
5	KH ₂ PO ₄	Alüminyum Folyo	Çalkalayıcı: Heidolph Titramax 100
6	MgSO ₄ .7H ₂ O	Milimetrik Cetvel	-80 °C Dondurucu
7	Fe-EDTA	Mikro Pipet	Vorteks
8	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O		Etüv
9	H ₃ BO ₃		Kabin: Class I hepa filtreli çift kişilik
10	MnSO ₄ .H ₂ O		Termometre
11	ZnSO ₄ .7H ₂ O		Büyütme Dolabı: Sanyo – MLR-350
12	CuSO ₄ .5H ₂ O		+4 °C Buzdolabı
13	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O		
14	C ₁₆ H ₁₄ O ₆ .H ₂ O		
15	KI		
16	KOH		
17	HCL		
18	AlCl ₃ . 6H ₂ O		

Kullanılan kimyasal ve doz oranları

Araştırmada, AlCl_3 kimyasalı kullanılmıştır. Kimyasal Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Bölümü'nden temin edilmiştir. Kullanılan kimyasal ve doz oranları Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 2. Stok Hoagland ve Arnon Çözeltisi Bileşenleri ve Miktarları

Makro Bileşenler	g/l	Stok Adı
KNO_3	101	A
KH_2PO_4	6,8	
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	18,486	B
Fe-EDTA	2,643	C
Mikro Bileşenler	g/l	Stok Adı
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,12	
H_3BO_3	0,31	
$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,326	D
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,057	
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,037	
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,0092	

Yöntem

Bu çalışmada kullanılan yöntem daha önce tarla şartlarında geliştirilen, ayrıca mutagen uygulanan genotip/genotiplerin alüminyum stresine karşı tolerans seviyeleri laboratuvar şartlarında kontrollü bir şekilde belirlenip değerlendirilmiştir.

Buğday tohumlarının sterilizasyonu

Çalışmada kullanılan tohumlara %70'lik etil alkol ile 2 dakika boyunca çalkalayıcı cihazında muamele edilmiştir. Steril kabin içerisinde alkolden çıkarılan tohumlar 3 kez saf su ile durulanarak filtre kâğıtlarında kurutulmuştur. Ardından tohumlara %30'luk sodyum hipoklorit çözeltisi ile 15 dakika süreyle çalkalayıcıda muamele edilmiştir. Tekrar steril kabin içerisinde tohumlar 4 defa saf su ile durulanarak işlem sonlandırılmıştır.

Tohum çimlenmesi ve fide oluşumu

Sterilizasyona tabi tutulan tohumlar, oda sıcaklığında petri kaplarının içerisine hazırlanan nemli filtre kağıdı üzerine 15 adet tohum gelecek şekilde yerleştirilmiştir. 24 saat süreyle oda sıcaklığında karanlık ortamda bekletilmiştir. 24 saatin sonunda tohumlar +4 C'de

buzdolabında 72 saat bekletilmiştir. Ardından süre sonunda tohumlar tekrar oda sıcaklığında 72 saat bekletilip çimlendirilmeye bırakılmıştır.

Hidroponik ortamın hazırlanması

Stok Hoagland ve Arnon solüsyonunun hazırlanması

Stok hidroponik solüsyonu, Hoagland and Arnon (1938) solüsyonu temel alınarak Tablo 2’te gösterilen mikro ve makro bileşenler kullanılarak hazırlanmıştır. Kimyasallar tartılıp 1 L saf su içerisinde manyetik karıştırıcıda çözündürülerek hazırlanmıştır. Deney gruplarında kullanılan hidroponik solüsyonun hazırlanması, Stok Hoagland ve Arnon (1938) solüsyonundan Tablo 3’te gösterilen oranlarda alınarak her bir doz grubu için 4 L saf su içerisine eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan çözeltiye Tablo 4’de gösterilen oranlarda $AlCl_3$ eklenip pH: 4.0 olarak ayarlanmıştır.

Deneme düzeninin kurulması

Deneme, 4 tekerrürlü olarak tesadüf parselleri deneme desenine göre kurulmuştur. Her tekerrür grubuna hazırlanan çözeltiden 400 ml eklenmiştir. Daha sonra senkronize çimlendirilen 3-5 cm boyuna ulaşan fidelerden tesadüfi olarak alınan 5 adet fide deneme ortamına alınmıştır. Deneme ortamı farklı alüminyum dozları ve Hoaglan ve Arnon (1938) besi ortamını içeren hidroponik sistemden oluşmaktadır. Fideler, $25\pm1^{\circ}C$ ’de 18 saat ışıklı ve 6 saat karanlık fotoperiyotta, $120 \mu mol \text{ photon}/m^2 \text{ s}$ foton yoğunluğunda hidroponik kültür sisteminde yetiştirilmiştir. Deneme 14. günde sonlandırılmıştır.

Tablo 3. Hidroponik Sistemde Kullanılacak Solüsyon Bileşenler

Çözelti Adı	Stok A	Stok B	Stok C	Stok D
Miktar (ml/l)	1,0	10	10	10

Tablo 4. Bezostaja, Demir 2000, Haymana 79, İzgi 2001, Kırık ve Mutan Hat Buğday Çeşitleri İçin Kullanılan Uygulamalar ve Doz Oranları

Kullanılan doz değerleri				
0,0 mM	10 mM	20 mM	30 mM	40 mM
	$AlCl_3$	$AlCl_3$	$AlCl_3$	$AlCl_3$
Kontrol	Doz-1	Doz-2	Doz-3	Doz-4

Hematoksilen boyama

Fideler, alüminyum içermeyen Hoagland ve Arnon (1938) besin solüsyonu içerisinde 32 saat büyütüldükten sonra, pH'ı 4.0 olan ve 25°C'de tutulan 0, 10, 20, 30, 40 mM alüminyum içeren besin solüsyonunda 17 saat tutulmuştur. Uygulama sonrası fideler alüminyum içeren besin solüsyonundan çıkarılmış ve kökleri steril su ile 2-3 defa iyice yıkanmıştır. %0.2'lik hematoksilen solüsyonu (2 g hematoksilen (katı) 900 mL distile suda çözülür, 0,2 g KI eklenir ve 1 litreye seyreltilir) içerisinde 15 dakika tutularak boyama işlemi gerçekleştirilmiştir (Rajaram and Villegas 1990). Fazla boya distile su ile yıkanmış ve fideler, 25°C'de alüminyum içermeyen besin ortamına aktarılarak 24 saat boyunca sürekli olarak havalandırılmıştır. Süre sonunda köklerin boyanmaları skalaya göre değerlendirilmiştir.

Araştırmada incelenen parametreler

Ölçümleri yapılan parametreler

- *Sürgün Uzunluğu*: Sürgünün tohum çıkış noktasından sürgününün uç bölgesine kadar olan kısım milimetrik cetvel ile ölçülmüştür.
- *Kök uzunluğu*: Kökün tohumdan çıktığı noktadan kök ucu bölgesine kadar olan kısım milimetrik cetvel ile ölçülmüştür.
- *Koleoptil uzunluğu*: Sürgün ile bağlantılı olan bu kısım tohumdan çıktığı nokta ile sürgünün alt kısmını sardığı noktanın ucuna kadar olan kısım milimetrik cetvel ile ölçülmüştür.
- *Kök sayısı*: Tek tek sayılıp belirtilmiştir.
- *Sürgün ve kök yaş ağırlıkları*: Her ikisi de tohumdan kopararak ayrı ayrı hassas terazi ile tartılıp etiketli olan alüminyum folyoya konulmuştur.
- *Çim uzunluğu*: Kök ucu ile sürgün ucu arasındaki mesafenin milimetrik cetvel ile ölçülmüştür.
- *Kök ve sürgün kuru ağırlığı*: Alüminyum folyoya konulan kök ve sürgün örnekleri etüet ale 50 °C 'de 72 saat boyunca bekletilip süre sonunda hassas terazi ile tartılarak saptanmıştır.
- Hematoksilen boyama sonrası kök uçlarının renk koyuluğuna göre alüminyum tolerans derecesi belirlenmiştir.

İstatiksel analiz

Araştırmamızda hidroponik kültür ortamında yetiştirilecek olan 6 ekmeklik buğday çeşidi arasında $AlCl_3$ toleransı belirlemek amacıyla tesadüfi deneme deseni kullanılmıştır. Bu

tesadüfî desen içerisinde; AlCl_3 ' un farklı konsantrasyonları (0 mM, 10 mM, 20 mM, 30mM, 40 mM) kullanılmıştır.

Deneme için; hidroponik sistem için hazırlanan Hoagland ve Arnon (1938) solüsyonu içerisinde AlCl_3 ' un 5 farklı konsantrasyonu eklenmesiyle denenmiştir. Rastgele düzenleme ile şansa bağlı deneme planına göre 4 tekerrürlü olarak yürütülmüştür.

Bu çalışmada, ekmeklik buğdaylar Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarla Bitkileri Laboratuvarları'nda yetiştirilmiştir. Önce yetiştirilen buğdayların çim parametreleri ölçülmüş kuru ağırlıkları etüv cihazında kurutulup belirlenmiş, daha sonra yetiştirilen buğdaylar tolerans seviyeleri hematoksilen boyama ile tespit edilmiştir.

Deneme sonucunda alınan ölçüm değerleri SPSS ve SAS istatistiksel analiz programı kullanılarak tesadüf parselleri deneme desenine göre varyans analizine tabi tutulmuştur ve önemli bulunan ana varyasyon kaynaklarının ortalamaları Duncan Çoklu Karşılaştırma Testiyle karşılaştırmıştır ($\alpha=0,05$).

ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Çalışmamızda altı genotipe ait buğday tohumları petri kaplarında yaklaşık 7-8 gün süreyle çimlendirilmiştir. Çimlendirilen tohumların fide uzunlukları 2-3 cm ulaştığında tesadüfi olarak 5 adet fide seçilmiş ve farklı konsantrasyonlarda alüminyum ihtiva eden Hoagland ve Arnon (1938) solüsyonu içeren hidroponik sisteme aktarılmıştır. Farklı alüminyum konsantrasyonunu içeren yetiştirme solüsyonunun pH değeri 4.0'a ayarlanmıştır. Farklı alüminyum konsantrasyonundan kaynaklı toksisiteye karşı kullandığımız buğday genotipleri 14 günlük süreç içerisinde gösterdikleri tolerans durumları gözlenmiştir. Alüminyum kaynaklı stres belirtileri hidroponik sistem içerisindeki bitkilerde dördüncü ve beşinci günde başladığı gözlenmiştir.

Çalışma kapsamında, beş farklı (0, 10, 20, 30, 40 mM $AlCl_3$.) konsantrasyonlarda alüminyum uygulamalarının çim parametreleri üzerine etkileri ölçülmüştür.

Çimlenme Parametreleri Üzerine Alüminyum Düzeylerinin Etkisi

Tablo 5. Buğday Genotipleri Fidelerine Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Çimlenme ile İlgili Bazı Karakterlere Ait Varyans Analizi Sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler ortalaması					
	SD	Kök sayısı	Kök uzunluğu	Sürgün uzunluğu	Koleoptil uzunluğu	Çim uzunluğu
Genotip (G)	5	2,019*	11,795**	78,564**	3,687**	131,353**
Doz (D)	4	3,275**	4,150	407,637**	0,745*	487,857**
Genotip × Doz	20	0,645	2,860	17,133*	0,761**	23,332
Hata	84	0,634	1,812	9,384	0,290	13,919
Toplam	114					

P < 0,05 İstatistiksel anlamlılık önemli (*)

P < 0,01 İstatistiksel anlamlılık çok önemli (**)

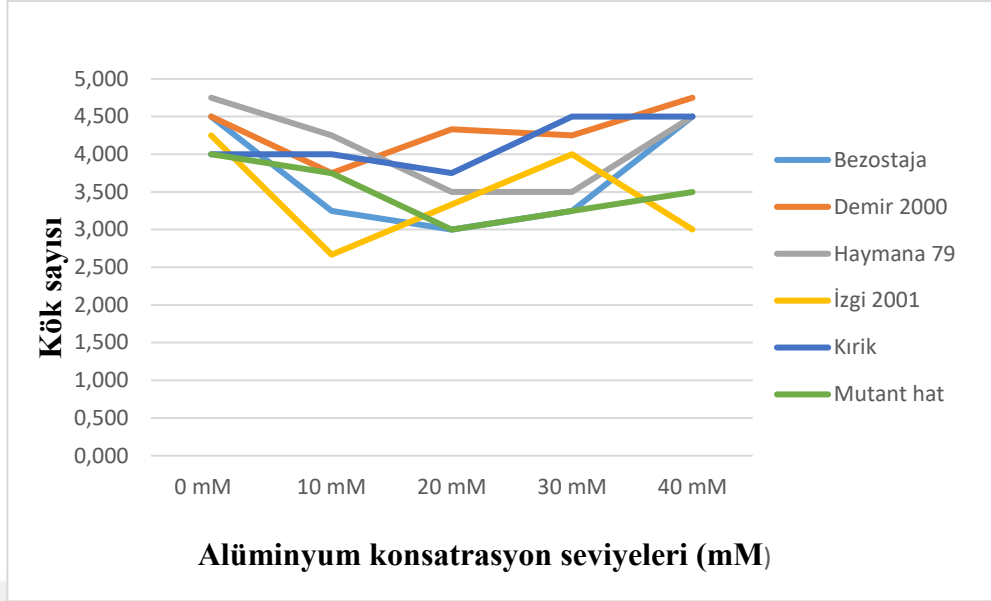
Tablo 6. Buğday Genotipleri Fidelerine Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Çimlenme ile İlgili Bazı Karakterlere Ait Varyans Analizi Sonuçları

Varyasyon Kaynağı	Kareler ortalaması				
	SD	Kök yaş ağırlığı	Sürgün yaş ağırlığı	Kök kuru ağırlığı	Sürgün kuru ağırlığı
Genotip (G)	5	0,014**	0,072**	0,000	0,000
Doz (D)	4	0,028**	0,383**	0,001	0,000
Genotip × Doz	20	0,003*	0,012*	0,001	0,000
Hata	84	0,002	0,006	0,001	0,000
Toplam	114				

P < 0,05 İstatistiksel anlamlılık önemli (*)

P < 0,01 İstatistiksel anlamlılık çok önemli (**)

Kök Sayısı Üzerine Farklı Alüminyum Dozlarının Etkisi



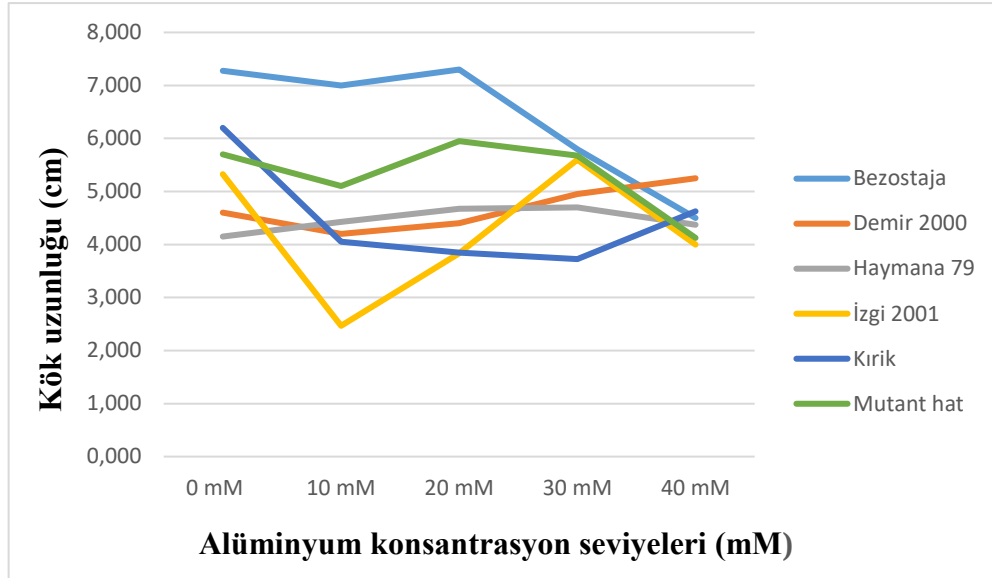
Şekil 3. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin kök sayısı üzerine etkileri

Fideler besin solusyonunda 14 gün boyunca 0, 10, 20, 30, 40 mM $AlCl_3$ maruz bırakılmış ve sonuçlar 4 tekerrürün ortalaması şeklinde gösterilmiştir

Tablo 5’de varyans analiz sonuçları incelendiğinde, kök sayısı parametresi açısından, (Bezostaja, Demir 2000, Haymana 79, İzgi 2001, Kırık ve Mutant hat) genotipler arası farkın önemli ($P<0,05$), farklı alüminyum doz uygulamaları (0, 10, 20, 30, 40 mM $AlCl_3$) arasındaki farkın ise istatistiksel olarak çok önemli ($P<0,01$) bulunmuştur.

Kök sayısı parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Deneme kapsamında kullanılan genotiplerin ortalama kök sayısı en fazla kontrol (0 mM) uygulamasında Bezostaja, Demir 2000 ve Haymana 79 genotiplerinde gözlenmiştir. Buna karşılık, en az kök oluşumu 10 ve 40 mM alüminyum uygulamasında İzgi 2001 çeşidi ve 20 mM alüminyum uygulamasında Mutant hatta belirlenmiştir (Tablo 7). Yaptığımız çalışmada en yüksek kök sayısı kontrol (0 mM) uygulamasında gözlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde Demir 2000 genotipi ile Bezostaja genotipi 0 mM (kontrol) uygulamasında ortalama 4.5 kök sayısı ile aynı sonucu vermiştir. Bununla beraber Bezostaja genotipinin de 0 – 40 mM konsantrasyonlarında aynı sayıda köke sahip olduğu gözlenmiştir. Demir 2000 genotipi ve Mutant hat diğer genotiplere nazaran kök sayısı seviyesinde önemli farklılık göstermiştir. Uygulanan alüminyumun konsantrasyonları arttıkça genotipler ve dozlar arasında benzer seviyede değerler gözlenmiştir.

Kök Uzunluğu Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi



Şekil 4. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin kök uzunluğu üzerine etkileri

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, kök uzunluğu parametresi açısından, genotipler arasındaki farkın çok önemli ($P<0,01$), farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın ise istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur (Tablo 5).

Kök uzunluğu parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 7’ de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan genotiplerin ortalama kök uzunluğu değerleri en yüksek 7,27 cm ile Bezostaja genotipinde gözlenmiştir. Buna karşılık en düşük değer 2,46 cm ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir. Deneme kapsamında en yüksek değeri kontrol (0 mM) uygulaması vermiştir. En düşük değeri ise 10 mM doz uygulaması vermiştir. Çalışmada kök uzunluğu için belirlenen alüminyum konsantrasyon seviyeleri ve genotiplerin interaksiyonuna ait ortalama değerler Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’ ün incelenmesinden de görüleceği gibi kök uzunluğu parametresi açısından en yüksek değer 7,3 cm ile Bezostaja çeşidinde 20 mM alüminyum uygulamasında elde edilirken, en düşük değer 2,46 cm ile İzgi 2001 çeşidi 10 mM alüminyum uygulamasıyla takip etmiştir.

Tablo 7. Buğday Genotipleri Tohumlara Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Çimlenme İle İlgili Bazı Karakterlere Ait Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları

Genotip	Doz (mM)	Kök sayısı	Kök uzunluğu	Sürgün uzunluğu	Koleoptil uzunluğu	Çim uzunluğu
Bezostaja	0	4,500	7,275	23,500	2,575	30,775
	10	3,250	7,000	10,400	3,150	17,400
	20	3,000	7,300	10,750	2,850	18,250
	30	3,250	5,800	9,050	3,250	15,150
	40	4,500	4,500	6,425	2,250	10,125
	Ortalama	3,700^{BC}	6,375^A	12,025^A	2,815^A	18,340^A
Demir2000	0	4,500	4,600	13,400	1,850	18,000
	10	3,750	4,200	11,600	2,475	15,800
	20	4,333	4,400	5,900	1,200	10,733
	30	4,250	4,950	7,475	2,475	12,350
	40	4,750	5,250	6,050	2,100	10,875
	Ortalama	4,317^A	4,680^B	8,885^B	2,020^C	13,552^B
Haymana79	0	4,750	4,150	17,350	2,250	21,500
	10	4,250	4,425	7,225	2,500	11,650
	20	3,500	4,675	7,325	2,700	12,225
	30	3,500	4,700	5,500	1,525	10,500
	40	4,500	4,375	5,250	2,100	9,375
	Ortalama	4,100^{AB}	4,465^B	8,530^B	2,215^{BC}	13,050^{BC}
İzgi2001	0	4,250	5,325	9,925	1,625	15,400
	10	2,667	2,467	3,600	0,733	6,500
	20	3,333	3,833	5,000	1,600	9,400
	30	4,000	5,600	5,725	2,075	11,775
	40	3,000	4,000	5,000	2,100	8,000
	Ortalama	3,450^{BC}	4,245^B	5,850^C	1,627^D	10,215^C
Kırık	0	4,000	6,200	14,875	2,600	21,075
	10	4,000	4,050	12,650	2,475	16,700
	20	3,750	3,850	6,350	2,375	10,200
	30	4,500	3,725	6,975	2,725	10,700
	40	4,500	4,625	6,875	2,300	11,175
	Ortalama	4,150^{AB}	4,490^B	9,545^B	2,495^{AB}	13,970^B
Mutant Hat	0	4,000	5,700	17,600	2,925	23,275
	10	3,750	5,100	11,500	3,150	16,600
	20	3,000	5,950	7,450	2,900	13,400
	30	3,250	5,675	7,075	2,650	12,750
	40	3,500	4,125	6,225	1,775	9,575
	Ortalama	3,500^C	5,310^B	9,970^B	2,680^A	15,120^B
Ortalama Doz	0	4,333 ^A	5,542 ^A	16,108 ^A	2,304 ^{AB}	21,671 ^A
	10	3,611 ^B	4,540 ^C	9,496 ^B	2,414 ^A	14,108 ^B
	20	3,486 ^B	5,001 ^{AB}	7,129 ^C	2,271 ^{AB}	12,368 ^B
	30	3,792 ^B	5,075 ^{AB}	6,967 ^C	2,450 ^A	12,204 ^{BC}
	40	4,125 ^A	4,479 ^C	5,971 ^C	2,104 ^B	9,854 ^C
	Ortalama	3,900	4,988	9,356	2,344	14,336

¹: Aynı sütunda aynı büyük harfle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar önemsizdir.

Tablo 8. Buğday Genotipleri Tohumlara Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Çimlenme İle İlgili Bazı Karakterlere Ait Duncan Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları

Genotip	Doz (mM)	Kök yaş ağırlığı	Sürgün yaş ağırlığı	Kök kuru ağırlığı	Sürgün kuru ağırlığı
Bezostaya	0	0,267	0,539	0,022	0,032
	10	0,143	0,227	0,020	0,040
	20	0,195	0,211	0,025	0,044
	30	0,232	0,204	0,029	0,032
	40	0,119	0,127	0,022	0,028
	Ortalama	0,191^A	0,262^A	0,024^A	0,035^A
Demir2000	0	0,268	0,571	0,018	0,040
	10	0,130	0,351	0,019	0,043
	20	0,205	0,135	0,030	0,033
	30	0,175	0,099	0,028	0,023
	40	0,212	0,171	0,026	0,033
	Ortalama	0,198^A	0,265^A	0,024^A	0,034^A
Haymana79	0	0,188	0,396	0,015	0,029
	10	0,139	0,197	0,016	0,033
	20	0,189	0,125	0,024	0,028
	30	0,161	0,113	0,025	0,027
	40	0,121	0,088	0,062	0,021
	Ortalama	0,159^B	0,183^B	0,028^A	0,028^A
İzgi2001	0	0,177	0,269	0,016	0,019
	10	0,046	0,046	0,008	0,010
	20	0,134	0,047	0,022	0,072
	30	0,129	0,063	0,022	0,018
	40	0,085	0,092	0,007	0,028
	Ortalama	0,114^C	0,103^C	0,015^A	0,029^A
Kırık	0	0,222	0,398	0,017	0,026
	10	0,123	0,207	0,018	0,031
	20	0,157	0,069	0,020	0,025
	30	0,171	0,096	0,021	0,023
	40	0,142	0,140	0,022	0,025
	Ortalama	0,163^B	0,182^B	0,020^A	0,026^A
Mutant Hat	0	0,155	0,307	0,016	0,029
	10	0,146	0,131	0,016	0,028
	20	0,151	0,126	0,019	0,032
	30	0,181	0,127	0,071	0,034
	40	0,169	0,153	0,023	0,032
	Ortalama	0,160^B	0,169^B	0,029^A	0,031^A
Ortalama Doz	0	0,213 ^A	0,413 ^A	0,017 ^A	0,029 ^{AB}
	10	0,121 ^D	0,193 ^B	0,016 ^A	0,031 ^{AB}
	20	0,172 ^{BC}	0,119 ^C	0,023 ^A	0,039 ^A
	30	0,175 ^B	0,117 ^C	0,033 ^A	0,026 ^B
	40	0,141 ^C	0,128 ^C	0,028 ^A	0,028 ^{AB}
	Ortalama	0,167	0,020	0,023	0,030

¹: Aynı sütunda aynı büyük harfle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar önemsizdir.

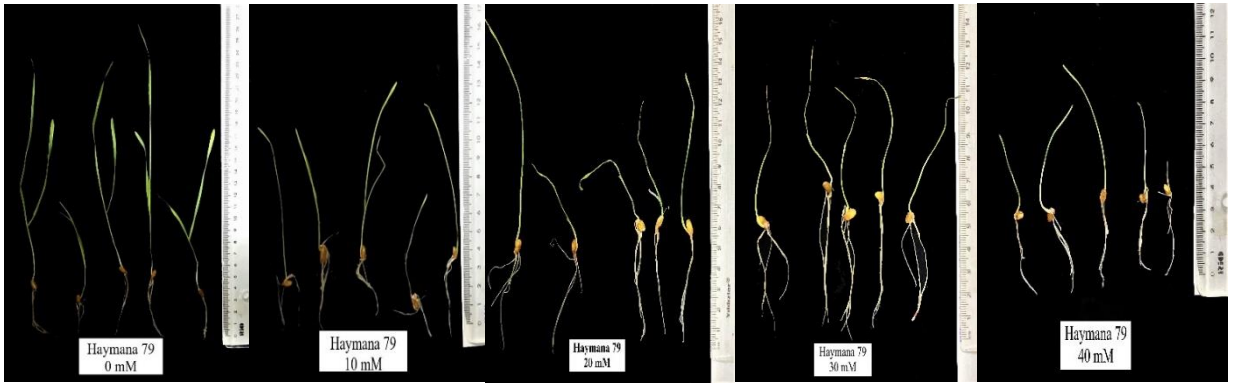
a)



b)

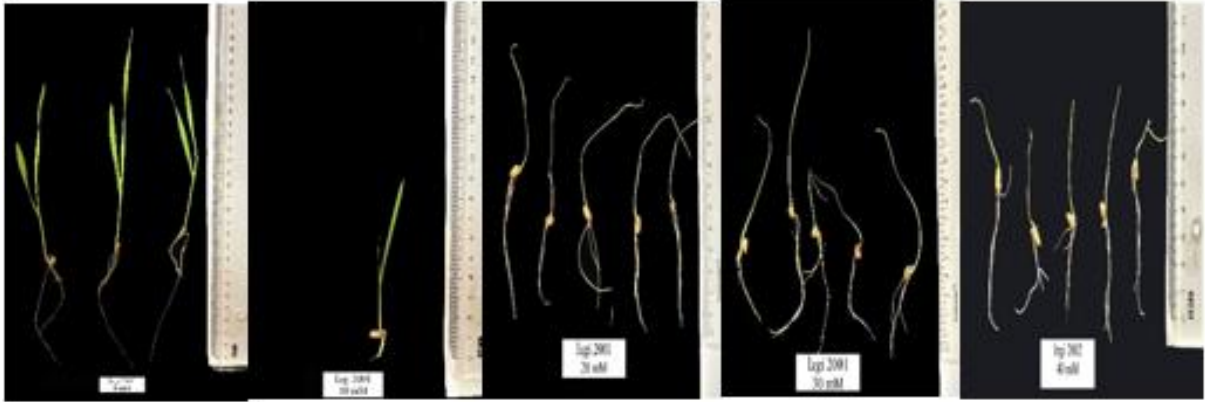


c)

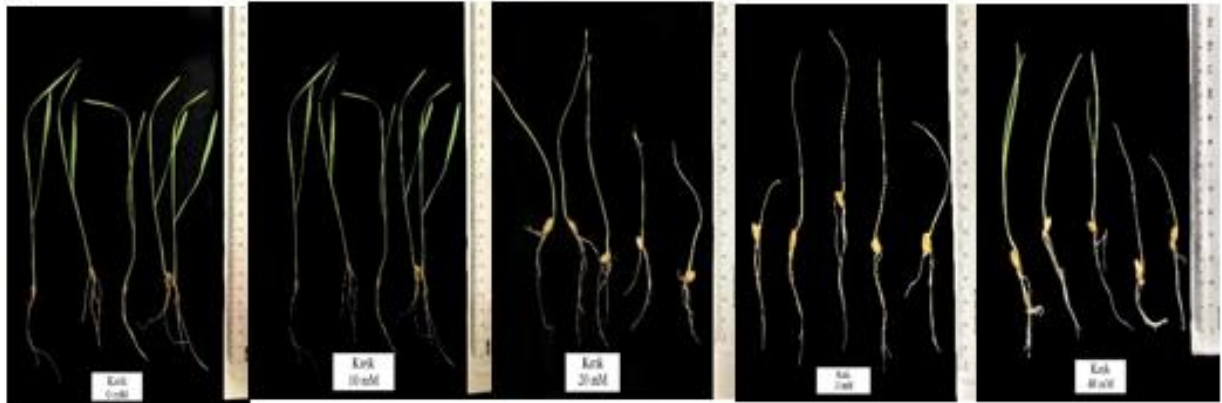


Şekil 5. Farklı alüminyum doz uygulanan genotiplere ait fide kök ve sürgün uzunluklarının görünümü. a) Bezostaja (0-10-20-30-40 mM), b) Demir 2000 (0-10-20-30-40 mM), c) Haymana 79 (0-10-20-30-40 mM)

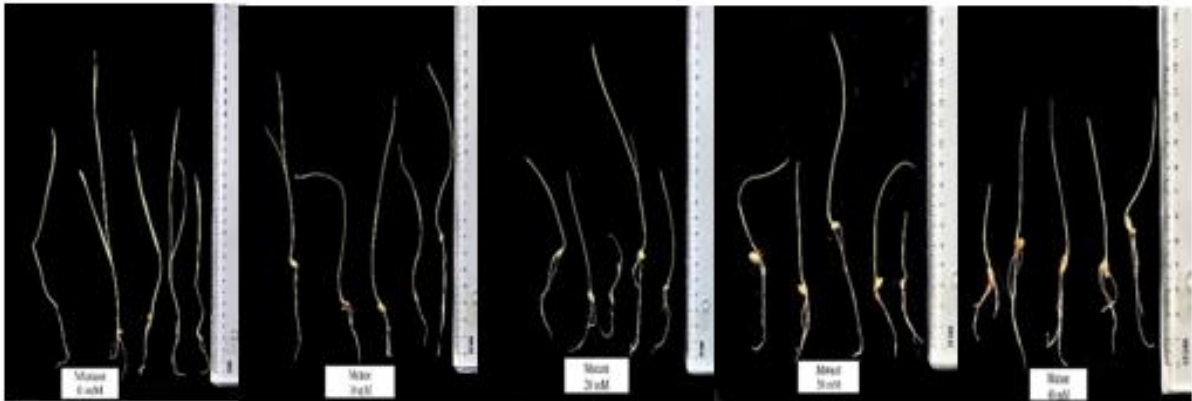
d)



e)

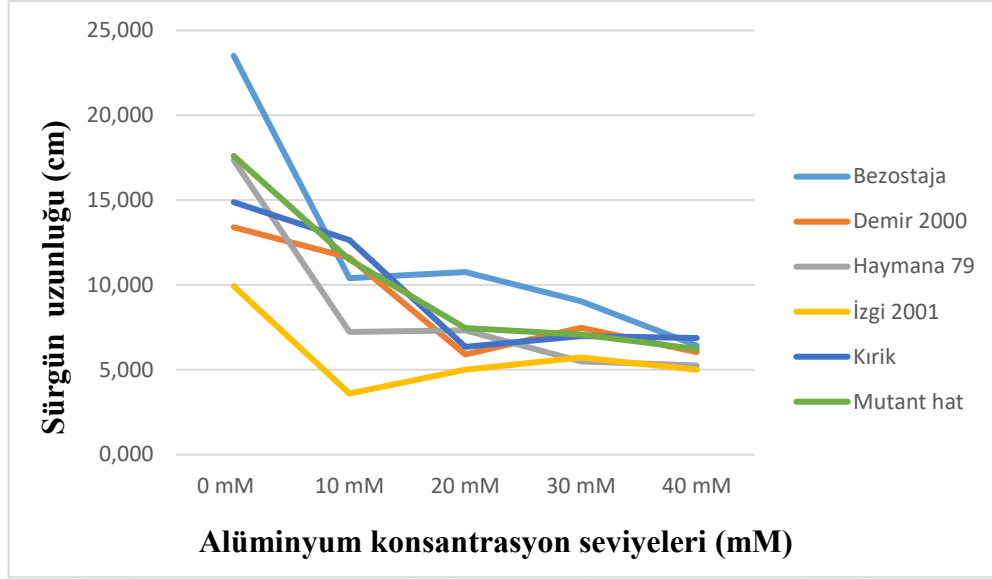


f)



Şekil 6. Farklı alüminyum doz uygulanan genotiplere ait fide kök ve sürgün uzunluklarının görünümü d) İzgi2001 (0-10-20-30-40 mM), e) Kırık (0-10-20-30-40 mM), f) Mutant hat (0-10-20-30-40 mM)

Sürgün Uzunluğu Üzerine Farklı Alüminyum Dozlarının Etkisi

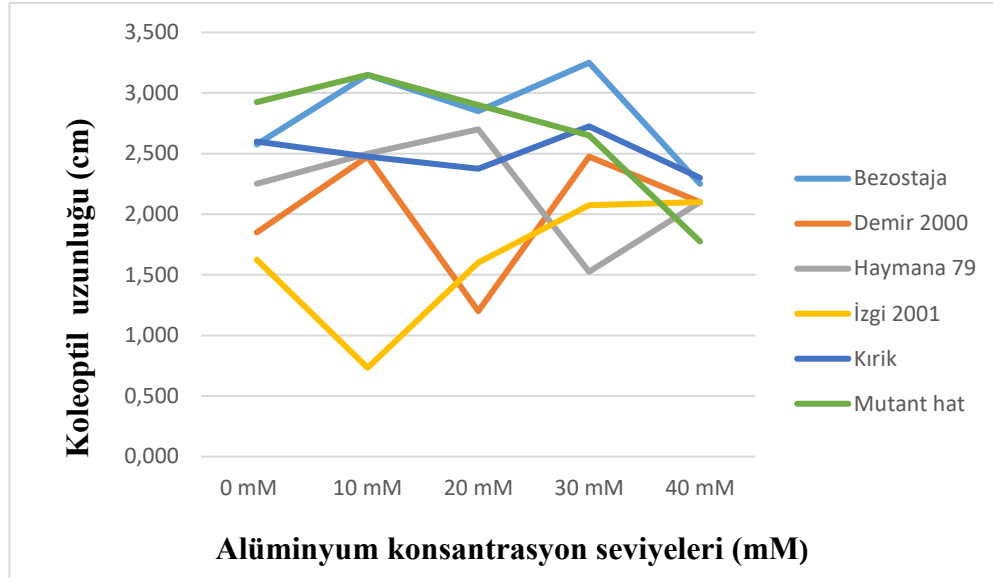


Şekil 7. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin sürgün uzunluğu üzerine etkileri

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, sürgün uzunluğu parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasında farkların istatistiksel olarak çok önemli ($P<0,01$) bulunmuştur (Tablo 5).

Sürgün uzunluğu parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan genotiplerin ortalama sürgün uzunluğu değerleri en yüksek 23,5 cm ile Bezostaja genotipinden elde edilirken bu genotipi 17,35 cm ile Haymana 79 takip etmiştir. En düşük 3,6 cm ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir. Çalışma kapsamında en yüksek değeri kontrol (0 mM) uygulaması vermiştir. Denemede sürgün uzunluğu parametresi için belirlenen genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları interaksiyonuna ait ortalama değerler Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7’ nin incelenmesinden de anlaşılabacağı gibi sürgün uzunluğu parametresi açısından en yüksek değer 23,5 cm ile Bezostaja genotipinde kontrol (0 mM) uygulamasından elde edilirken bu genotipi 17,6 – 17,3 cm ile Mutant hat ve Haymana 79 genotipleri takip etmiştir. Uygulanan alüminyum dozları arttıkça oluşan sürgün uzunluğunda bir azalma eğilimi gözlenmiştir.

Koleoptil Uzunluğu Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi

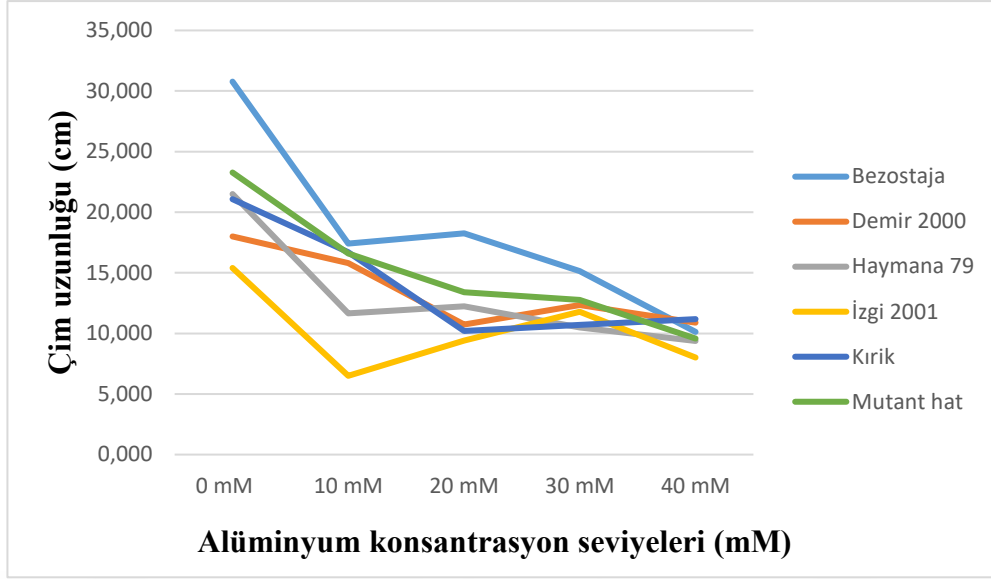


Şekil 8. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin koleoptil uzunluğu üzerine etkileri

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, koleoptil uzunluğu parametresi açısından genotipler arası farkın çok önemli ($P<0,01$), farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın ise istatistiksel olarak önemli ($P<0,05$) olduğu belirlenmiştir (Tablo 5).

Koleoptil uzunluğu parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Denemede kullanılan genotiplerin ortalama koleoptil uzunluğu değerleri en yüksek 2,92 cm ile Mutant hat da gözlenmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,73 cm ile İzgi 2001 genotipten elde edilmiştir. Çalışma kapsamında en yüksek değeri 30 mM uygulaması vermiştir. Çalışmada koleoptil uzunluğu özelliği için belirlenen genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları interaksiyonuna ait ortalama değerler Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8’ in incelenmesinden de anlaşılabacağı gibi koleoptil uzunluğu parametresi açısından en yüksek değer 3,25 cm ile Bezostaja genotipinde 30 mM alüminyum uygulamasından elde edilmiştir. Bu genotipi 3,15 cm ile Mutant hat takip etmiştir. Uygulanan alüminyum dozları ile oluşan koleoptil uzunluğu arasında karmaşık bir ilişki olduğu gözlenmiştir.

Çim Uzunluğu Üzerine Farklı Alimünyum Dozlarının Etkisi

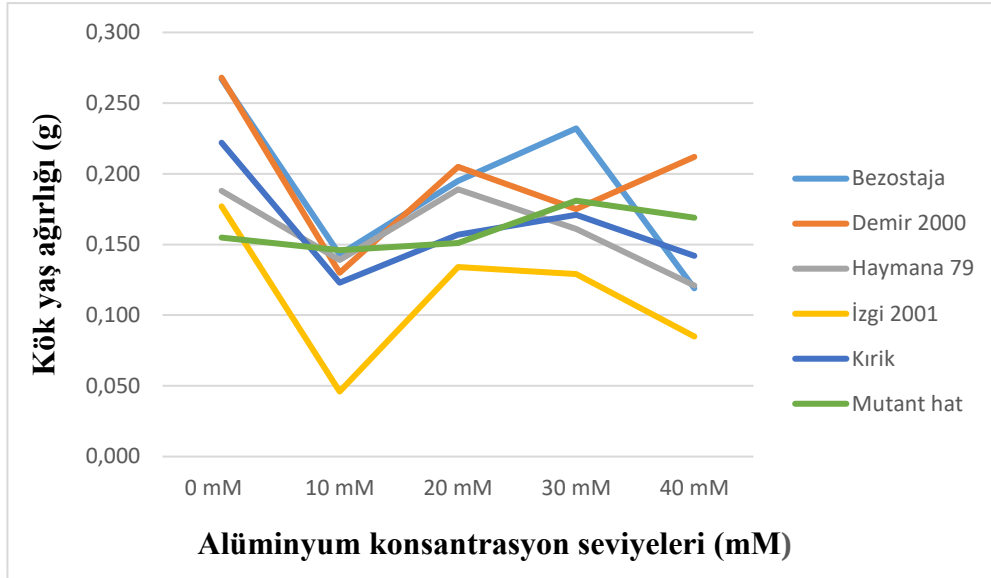


Şekil 9. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin çim uzunluğu üzerine etkileri

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, çim uzunluğu parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın istatistiksel olarak çok önemli ($P < 0,01$) olduğu gözlenmiştir (Tablo 5).

Çim uzunluğu özelliğine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan genotiplerin ortalama çim uzunluğu değerleri en yüksek 30,77 cm ile Bezostaja genotipinden elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 6,5 cm ile İzgi 2001 genotipinde gözlenmiştir. Deneme kapsamında en yüksek değeri kontrol (0 mM) uygulaması vermiştir. Çalışmada çim uzunluğu parametresi için belirlenen genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları interaksiyonuna ait ortalama değerler Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 9’ un incelenmesinden de görüleceği gibi çim uzunluğu parametresi açısından en yüksek değer 30,7 cm ile Bezostaja genotipinde kontrol (0 mM) uygulamasından elde edilirken, bu genotipi 15,8 cm ile Demir 2000 genotipi takip etmiştir. Uygulanan alüminyum dozları arttıkça oluşan kök sayısında bir azalma eğilimi gözlenmiştir.

Kök Yaş Ağırlığı Üzerine Farklı Alüminyum Dozlarının Etkisi

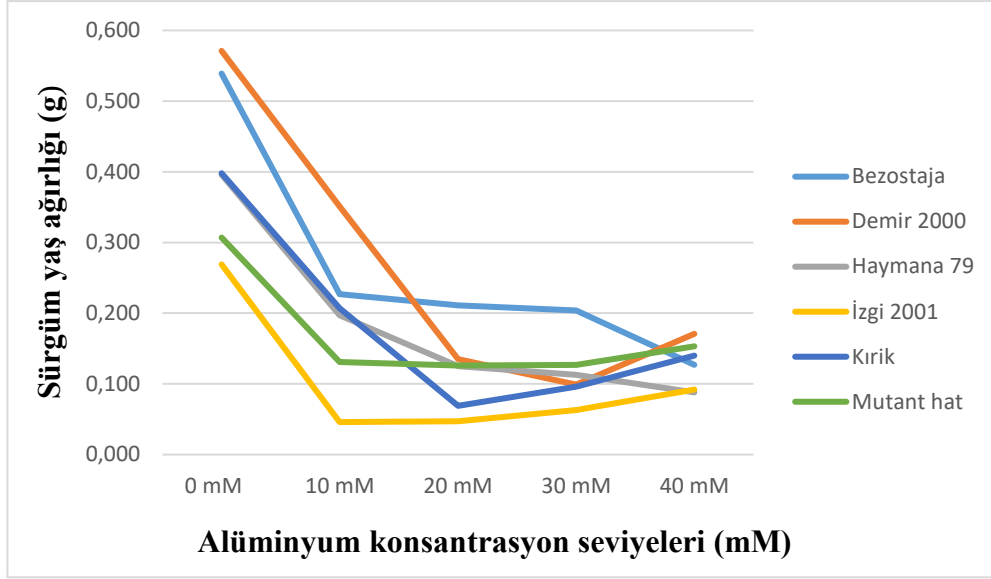


Şekil 10. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin kök yaş ağırlığı üzerine etkileri

Tablo 6’da verilen varyans analiz sonuçları incelendiğinde, kök yaş ağırlığı parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın istatistiksel olarak çok önemli ($P<0,01$) olduğu gözlenmiştir.

Kök yaş ağırlığı parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan genotiplerin ortalama kök yaş ağırlığı değerleri en yüksek 0,268 – 0,267 g ile Demir 2000 ve Bezostaja genotipinde gözlenmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,046 g ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir. Çalışmada kapsamında en yüksek değeri kontrol (0 mM) uygulaması vermiştir. Denemede kök yaş ağırlığı parametresi için belirlenen genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları interaksiyonuna ait ortalama değerler Şekil 10’da verilmiştir. Şekil 10’ un incelenmesinden de görüleceği gibi kök yaş ağırlığı parametresi açısından en yüksek değer 0,267 g ile Bezostaja genotipinde kontrol (0 mM) uygulamasından elde edilmiştir. Bu genotipi 0,174 g ile Demir 2000 genotipi takip etmiştir. Uygulanan alüminyum dozları ile oluşan kök yaş ağırlığı arasında kompleks bir ilişkinin olduğu gözlenmiştir.

Sürgün Yaş Ağırlığı Üzerine Farklı Alüminyum Dozlarının Etkisi

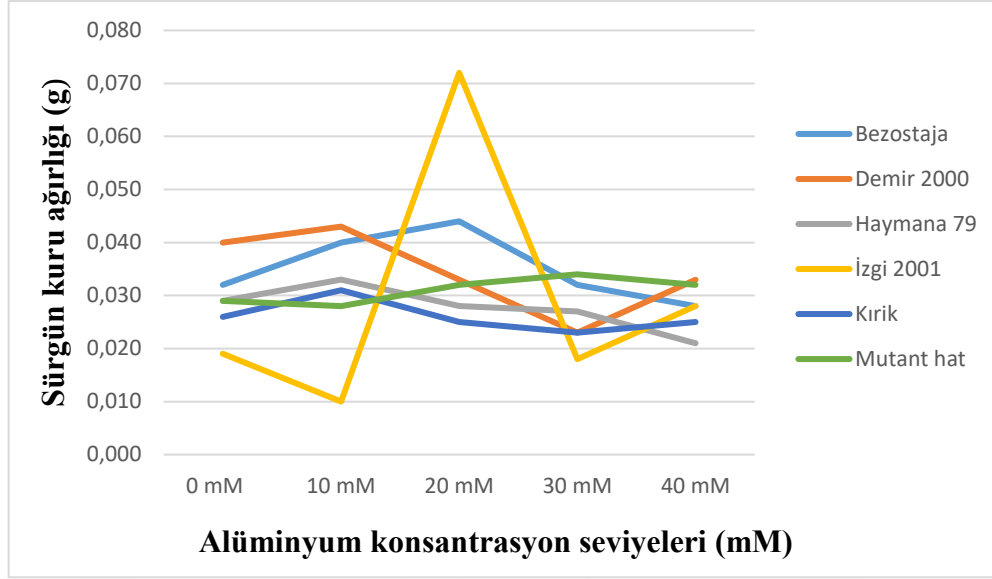


Şekil 11. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin sürgün yaş ağırlığı üzerine etkileri

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, sürgün yaş ağırlığı parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın istatistiksel olarak çok önemli ($P < 0,01$) olduğu gözlenmiştir (Tablo 6).

Sürgün yaş ağırlığı parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan genotiplerin ortalama sürgün yaş ağırlığı değerleri en yüksek 0,571 g ile Demir 2000 genotipinden elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,046 g ile İzgi 2001 genotipinden gözlenmiştir. Deneme kapsamında en yüksek değeri kontrol (0 mM) uygulaması vermiştir. Çalışmada sürgün yaş ağırlığı parametresi için belirlenen genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları interaksiyonuna ait ortalama değerler Şekil 11’de verilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde sürgün yaş ağırlığı parametresi açısından en yüksek değer 0,571 g ile Demir 2000 genotipinde kontrol (0 mM) uygulamasından elde edilirken bu genotipi 0,539 g ile Bezostaja genotipi takip etmiştir. Uygulanan alüminyum dozları arttıkça oluşan sürgün yaş ağırlığı bir azalma eğilimi gözlenmiştir.

Sürgün Kuru Ağırlığı Üzerine Farklı Alüminyum Dozlarının Etkisi

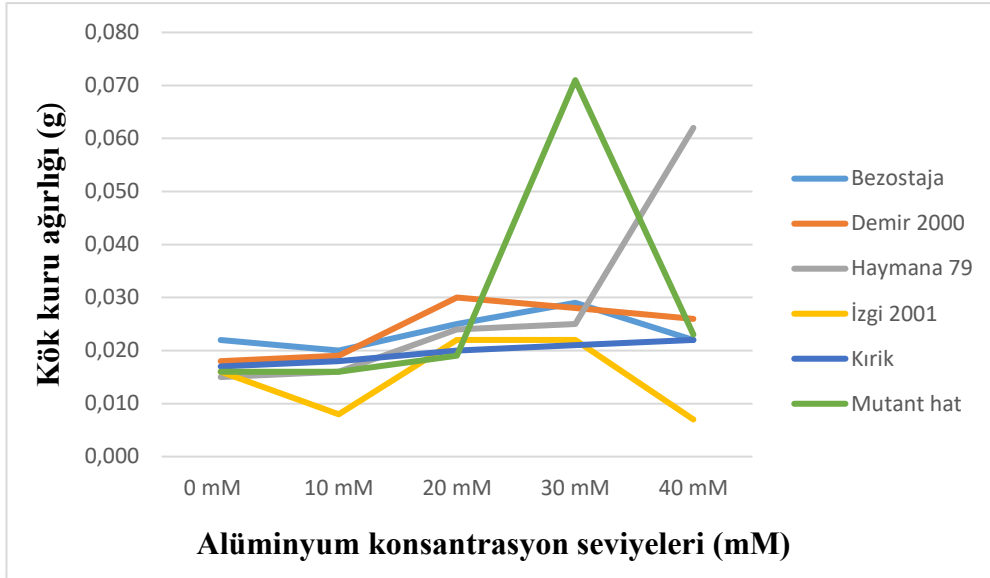


Şekil 12. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin sürgün kuru ağırlığı üzerine etkileri

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, sürgün kuru ağırlığı parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz ($P < 0,01$) olduğu gözlenmiştir (Tablo 6).

Sürgün kuru ağırlığı parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Araştırmada kullanılan genotiplerin ortalama sürgün kuru ağırlığı değerleri en yüksek 0,072 g ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,010 g ile İzgi 2001 genotipinde tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında en yüksek değeri 20 ve 30 mM uygulamaları vermiştir. Çalışmada çim uzunluğu parametresi için belirlenen genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları interaksyonuna ait ortalama değerler Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 12’ nin incelenmesinden de görüleceği gibi sürgün kuru ağırlığı parametresi açısından en yüksek değer 0,072 g ile İzgi 2001 genotipinde 20 mM alüminyum uygulamasından elde edilirken bu genotipi 0,044 g ile Bezostaja genotipi takip etmiştir. Uygulanan alüminyum dozları arttıkça oluşan sürgün kuru ağırlığında kompleks bir ilişki olduğu gözlenmiştir.

Kök Kuru Ağırlığı Üzerine Farklı Alüminyum Dozlarının Etkisi



Şekil 13. Farklı alüminyum konsantrasyonları ve buğday genotiplerinin kök kuru ağırlığı üzerine etkileri

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, kök kuru ağırlığı parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki istatistiksel ($P<0,01$) olarak fark gözlenmiştir (Tablo 6).

Kök kuru ağırlığı parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Denemede kullanılan genotiplerin ortalama kök kuru ağırlığı değerleri en yüksek 0,71 gr ile Mutant hattın elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,007 gr ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir. Deneme kapsamında en yüksek değeri 30 mM uygulamaları vermiştir. Çalışmada kök kuru ağırlığı parametresi için belirlenen genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları interaksiyonuna ait ortalama değerler Şekil 13’de verilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde kök kuru ağırlığı parametresi açısından en yüksek değer 0,022 g ile Bezostaja genotipinde kontrol (0 mM) uygulamasından elde edilirken bu genotipi 0,018 g ile Demir 2000 genotipi takip etmiştir. Uygulanan alüminyum dozları arttıkça oluşan kök kuru ağırlığında karmaşık bir ilişki gözlenmiştir.

Hematoksilen boyama

Varyans analiz sonuçları incelendiğinde, kök ucu boyama parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki fark önemli ($P < 0,05$) bulunmuştur (Tablo 9). Genotip x doz intreaksiyonuna bakıldığında farkın önemsiz olduğu anlaşılmıştır.

Kök ucu boyama parametresine ait genotip ve farklı alüminyum doz uygulamaları ortalama değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Denemede kullanılan genotiplerin ortalama kök ucu boyama değerleri en fazla 3.4 ile Kırık (kontrol) genotipinden elde edilmiştir. Buna karşılık, en az 2.8 ile Mutant hattın elde edilmiştir. Kırık genotipinin daha yoğun boyanması (Şekil 14 ve Şekil 15) neticesinde alüminyum toksisitesine duyarlı olduğu anlaşılmıştır. Mutant hattın kök uçlarının daha az boyanması (Şekil 16 ve Şekil 17) kontrol genotipe (Kırık) göre alüminyum toksisitesine daha toleranslı olduğu gözlenmiştir. Deneme kapsamında en fazla boyanma değeri 30 mM uygulaması vermiştir. En az boyanma değerini ise kontrol (0 mM) uygulaması vermiştir.

Tablo 9. Buğday Genotipleri (Kırık ve Mutant Hat) Fidelerine Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Köklere Uygulanan Hematoksilen Boyama Sonrası Ölçümlere Ait Varyans Analizi Sonuçları

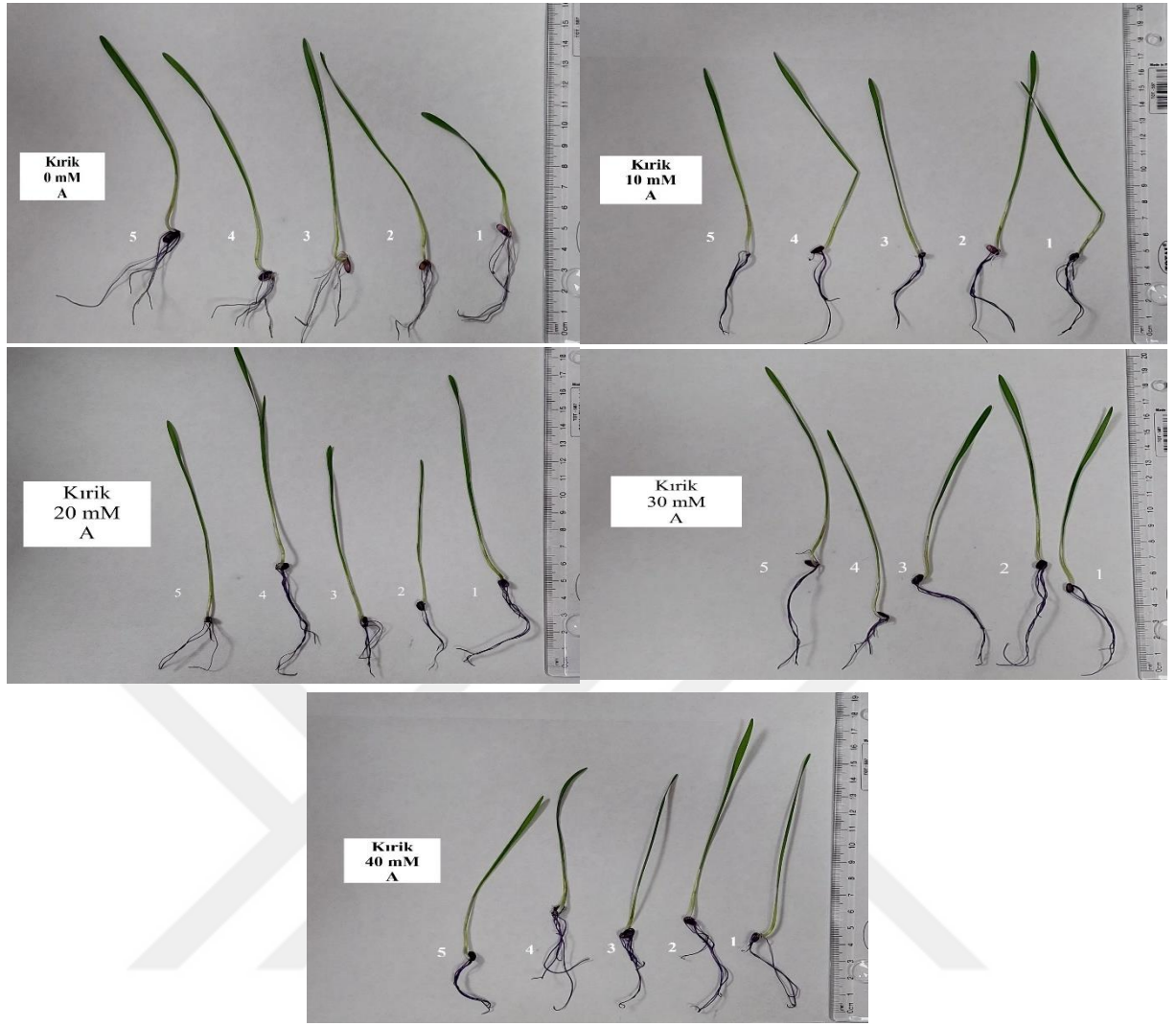
Varyasyon kaynağı	SD	Karaler ortalaması	Pr > F
Doz	4	2,143	0.0045
Genotip	1	2.048	0.0229
Genotip x Doz	4	0.463	0.2416

$P < 0,05$ İstatistiksel anlamlılık önemli

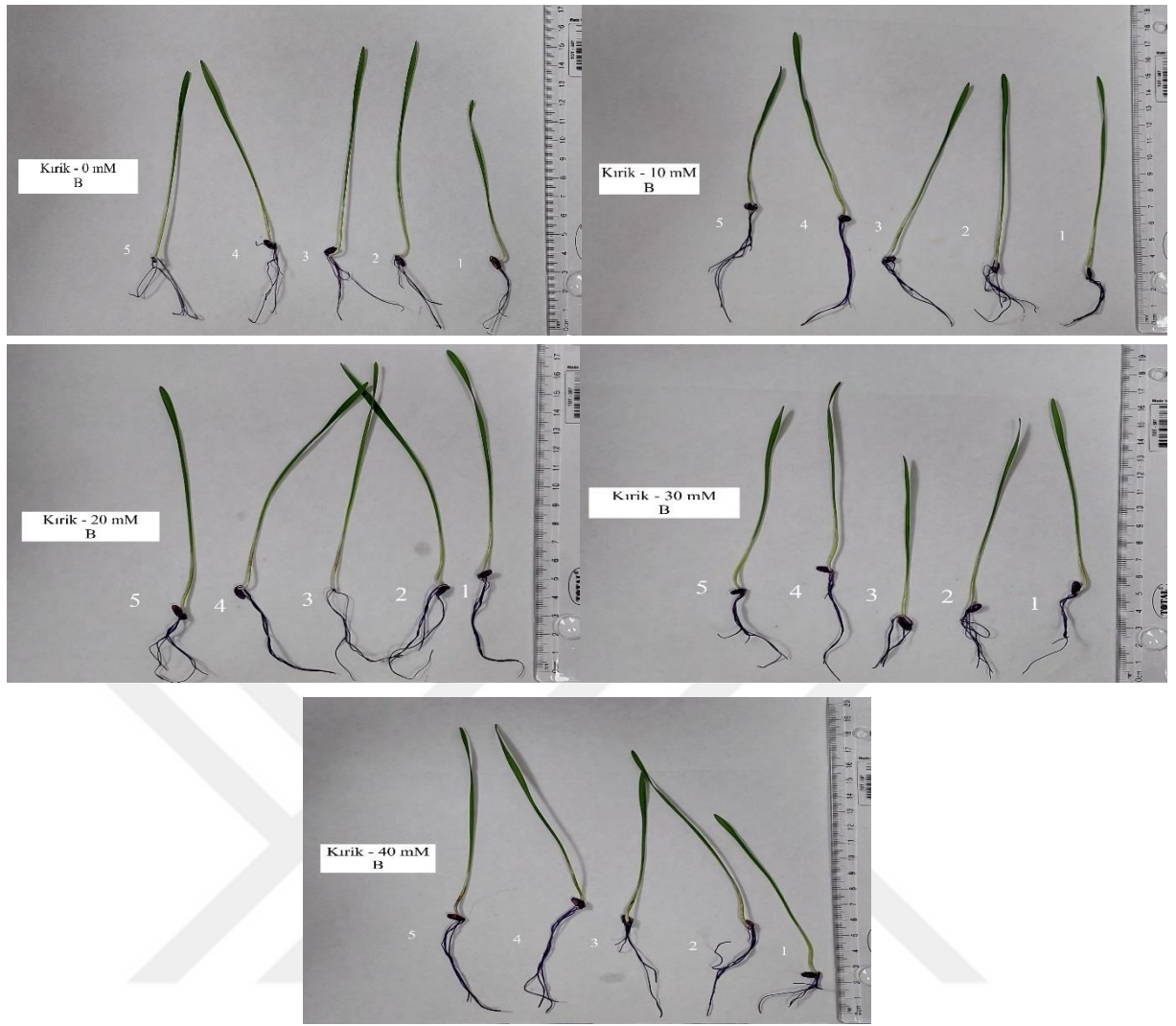
Tablo 10. Buğday Genotipleri (Kırık ve Mutant Hat) Fidelerine Farklı Dozlarda Alüminyum Uygulamasından Sonra Köklere Uygulanan Hematoksilen Boyama Sonrası Ölçümlere Ait Duncan Çoklu Karşılaştırma Analizi Sonuçları

Faktörler		N	Ortalama
Genotip	Kırık	10	3.440 ^A
	Mutant	10	2.800 ^B
Doz (mM)	0	4	1.850 ^B
	10	4	3.500 ^A
	20	4	3.250 ^A
	30	4	3.700 ^A
	40	4	3.300 ^A

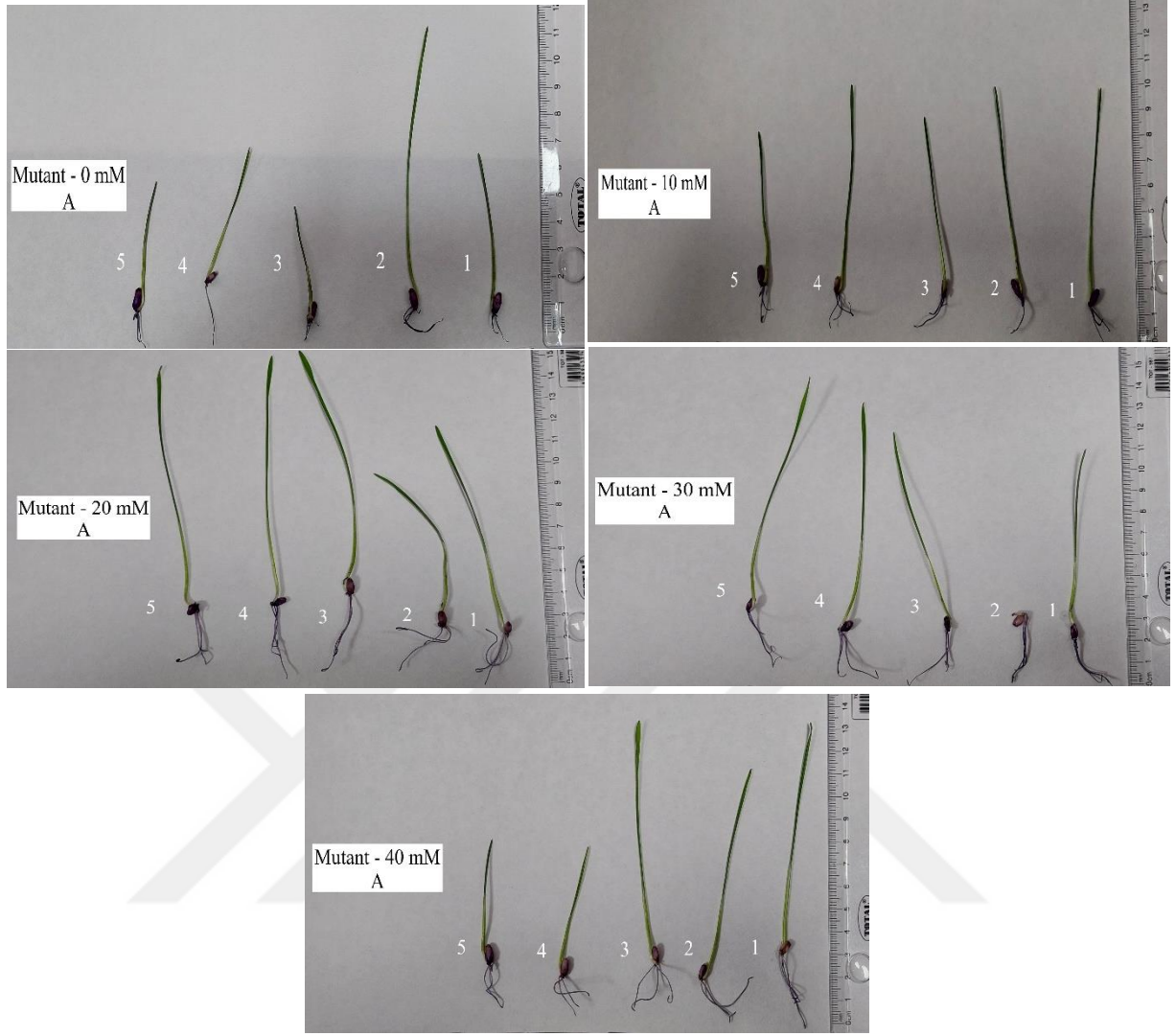
Aynı sütunda aynı büyük harfle gösterilen ortalamalar arasındaki farklar önemsizdir.



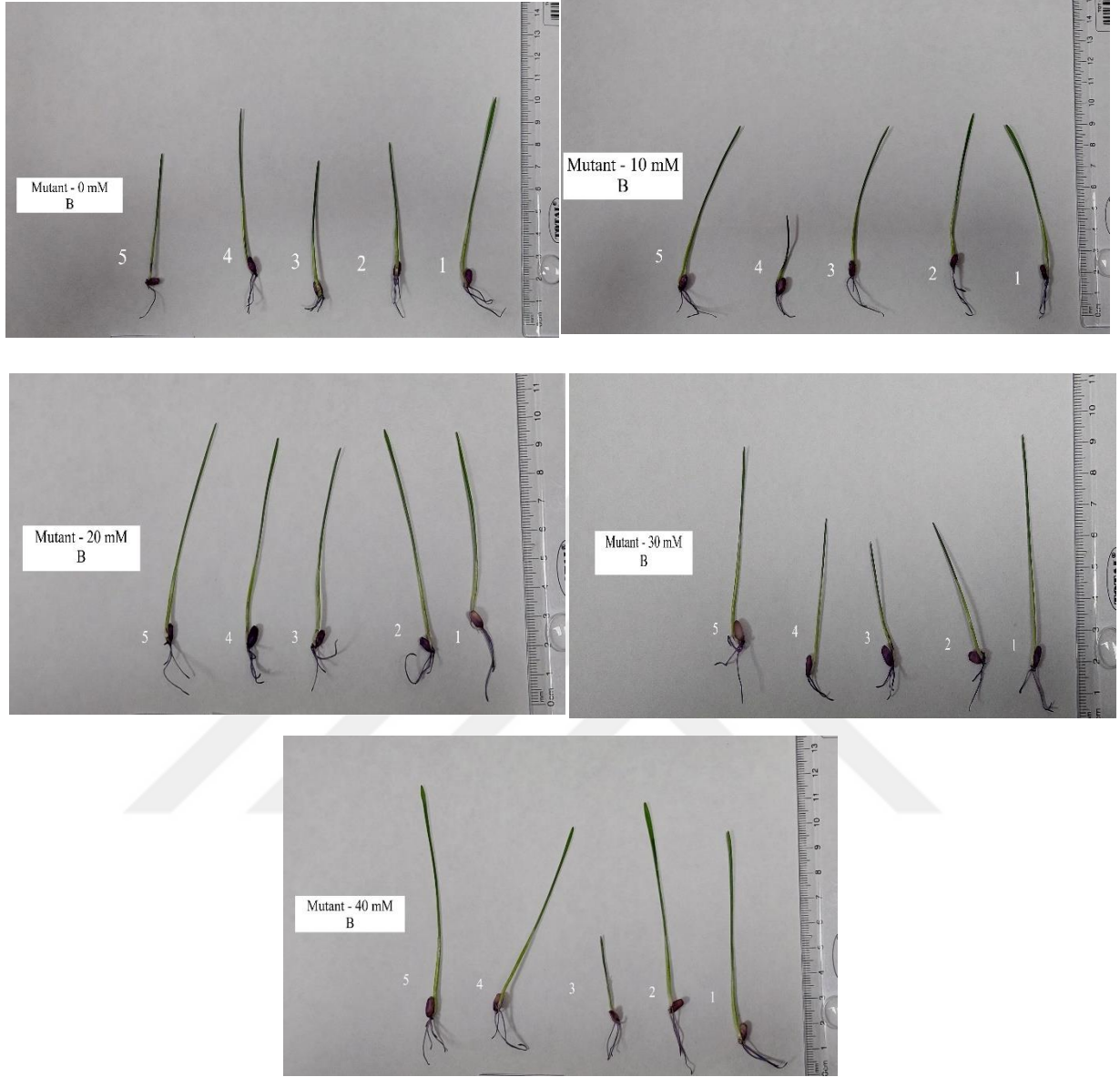
Şekil 14. Kontrol genotipe (Kırık) ait olan buğday fidelerine farklı konsantrasyonlarda alüminyum uygulaması sonrası kök ucunun hematoksilen boyama yöntemiyle boyanması görselleri (A)



Şekil 15. Kontrol genotipe (Kırık) ait olan buğday fidelerine farklı konsantrasyonlarda alüminyum uygulaması sonrası kök ucunun hematoksilen boyama yöntemiyle boyanması görselleri (B)



Şekil 16. Mutant hatta ait olan buğday fidelerine farklı konsantrasyonlarda alüminyum uygulaması sonrası kök ucunun hematoksilen boyama yöntemiyle boyanması görselleri (A)



Şekil 17. Mutant hatta ait olan buğday fidelerine farklı konsantrasyonlarda alüminyum uygulaması sonrası kök ucunun hematoksilen boyama yöntemiyle boyanması görselleri (B)

TARTIŞMA

İnsan ve hayvan beslenmesinde dünya da ve ülkemizde tarımsal üretimi yapılan ürünler arasında buğday çok önemli paya sahiptir. Dünyanın her yerinde rahatlıkla yetişebilmesi, tarımın kolay ve makinaya dayalı oluşu, taşıma ve depolanmasının kolaylığı, ucuz ve kaliteli bir besin kaynağı oluşu, dünya nüfusunun artışının karşısında buğday giderek “stratejik” bir nitelik kazanmaktadır (Akkaya 1994). Buğday verimliliğini önemli ölçüde etkileyen başlıca nedenlerden biri de ağır metallerin (alüminyum, arsenik, bakır, civa, çinko, kadmiyum, kobalt, krom, kurşun, molibden, nikel ve selenyum gibi) varlığındaki artışlardır. Bu ağır metallerin oluşturduğu kirlilik, büyüme ve gelişmeyi, fizyolojik aktiviteleri, bitki besin elementlerinin alımını olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir (Yağdı *et al.* 2000). Alüminyum (Al) stresi, asidik topraklarda bitki büyümesini ve gelişmesini engelleyen başlıca sınırlamalardan biridir (Foy 1988; Taylor 1988; Kochian 1995; Zhao *et al.* 2014; Rahman *et al.* 2018; Liu *et al.* 2018; Santos *et al.* 2019; Yan *et al.* 2022) Alüminyum pH’ın 6-8 arası olduğu durumlarda zararsızdır, alüminyumun toksik hale geçtiği ortam pH’ın 5 veya 5 in altına düştüğü koşullardır. Ortamın pH değerinin düşmesi durumunda alüminyum toksik forma dönüşür. Toksik forma dönüşen alüminyum bitkide kök ucu meristeminde büyümeyi sınırlandırdığı gibi aynı zamanda bitki veriminde de düşmelere neden olmaktadır (Rincon and Gonzales, 1992; Delhaize *et al.* 1993). Alüminyum bitkinin kök uçlarında ve yan köklerde hücre bölünmesini engeller, hücre çeperinin sertleşmesine neden olur. Aynı zamanda bitkinin topraktan gerekli besinleri alması için gereken emilim özelliğine olumsuz etki eder (Kochian *et al.* 2005).

Çalışmamızda, petri kabında çimlendirilen ve hidroponik solüsyonda yetiştirilen buğdayların fide karakterleri üzerine farklı alüminyum dozu uygulamalarının etkisi üzerinde durulmuştur. Farklı alüminyum uygulamaları, kök sayısı, kök uzunluğu, sürgün uzunluğu, koleoptil uzunluğu, çim uzunluğu, kök yaş ağırlığı, sürgün yaşa ağırlığı, kök kuru ve sürgün kuru ağırlığı gibi fide karakterlerinin üzerinde etkilidir. Benzer bir çalışmada tritikale ve buğday genotiplerinin hidroponik solüsyonlarda alüminyuma tepki olarak önemli farklılıklar gösterdiğini belirtmişlerdir (Kim *et al.* 2002). Çalışmamızda altı buğday genotipe ait fideler Hoagland ve Arnon (1938) solusyonunda 14 gün boyunca 0, 10, 20, 30, 40 mM $AlCl_3$ maruz bırakılmış daha sonra bitkilerin fide kök ve sürgün uzunlukları ölçümleri yapılmış ve görselleştirilmiştir (Şekil 5. ve Şekil 6.). Ölçümlerin sonucunda kök büyümesinde gerilemenin yanında bazı genotipler arasında kompleks bir ilişki gözlenmiştir. Nispeten daha düşük alüminyum doz uygulamalarında, fidelerin kök ve sürgün büyümeleri üzerinde uyarıcı etki

kaydedilmiştir. On dört günlük periyodun sonunda, altı genotipin sürgün büyümleri inhibisyonu, düşük konsantrasyonda ihmal edilebilir düzeydeydi. Benzer şekilde *Samuels et al.* (1997) tarafından yapılan araştırmada, alüminyum stresi altında farklı buğday genotiplerinde kök gelişiminin farklı olduğu bildirilmiş ancak bazı durumlarda düşük konsantrasyonların uyarıcı etkisinin olduğunda belirtmişlerdir.

Bizim çalışmamızda kök sayısı sonuçları incelendiğinde, en fazla kök sayısı Bezostaja, Demir 2000 ve Haymana 79 genotiplerinde kontrol uygulamasında gözlenmiş, uygulanan alüminyum konsantrasyonları arttıkça kök sayısında genotipler arasında kompleks bir ilişki olduğu farkedilmiştir. Alüminyumun yüksek konsantrasyonunda İzgi 2001 genotipinin kök sayısında diğer genotiplerin kök sayılarına göre kıyaslandığında daha düşük seviye gözlenmiştir (Tablo 7). Kök sayısı parametresi açısından genotipler arası farkın çok önemli ($P<0,05$) ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın önemli ($P<0,01$) olduğu bulunmuştur (Tablo 5). Çalışmamızda kullandığımız genotipler arasında en yüksek kök uzunluğu 7,27 cm ile Bezostaja genotipinde gözlenmiştir. Buna karşılık en düşük kök uzunluğu 2,46 cm ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir. Kurduğumuz denemede en yüksek değeri kontrol (0 mM) uygulaması vermiştir. En düşük değeri ise 10 mM doz uygulaması vermiştir. Bunun nedeni İzgi 2001 genotipinde homojen çimlenme gerçekleşmediği için dozlar arasında değişiklikler gözlemlenmiştir. Kök uzunluğu parametresi açısından genotipler arasındaki farkın çok önemli ($P<0,01$), farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki fark önemsiz olduğu bulunmuştur (Tablo 5). Bizim çalışmamızda alüminyum konsantrasyonu arttıkça kök büyümlerinde düşüş olduğu gözlenmiştir. Benzer şekilde, Foy and Fleming, (1978) tarafından yapılan çalışmada Durum buğdayında kök uzamasında alüminyumun inhibitör etkisinin önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Alamgir *et al.* (2009) yaptıkları bir araştırmada alüminyum konsantrasyonunun artması, bitkilerde su ve besin alımını destekleyen köklerin büyümesini ve gelişimini engellediğini ve alüminyum toksisitesinin neden olduğu seminal kök gelişimi için endosperm ve nişastanın hidrolizi ve oksijen temininin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Yine benzer şekilde araştırmacılar, Al konsantrasyonlarının artması ile birlikte arpa (Frantzios *et al.*, 2001), bakla (Tamas *et al.* 2005) bitkilerinde de kök büyümesinin engellediğini rapor etmişlerdir. Literatürdeki bu çalışmaların bulguları ile denemede kullandığımız genotiplerden elde ettiğimiz sonuçlar ile kısmen uyumlu olduğu bulunmuştur. Sürgün uzunluğu (Tablo 5) sonuçlarımız incelendiğinde genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasında farkların çok önemli ($P<0,01$) olduğu bulunmuştur. Ekimden 4, 8 ve 14 gün sonra kontrole kıyasla sürgün uzunluğu 30 ve 40 mM alüminyumun konsantrasyonu altında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da 30 ve 40 mM konsantrasyonlarının buğday fidelerinin büyümesi ve gelişmesi için toksik etki göstermeye başladığının bir göstergesidir. Benzer şekilde Sarker *et al.*

(2019) tarafından yapılan araştırmada ekimden 4, 6 ve 8 gün sonra kontrole kıyasla fide büyüme parametrelerinde 100 µM alüminyumun altında azaldığını ve 100 µM konsantrasyonunun buğday fidelerinin büyümesi ve gelişmesi için toksik etki gösterdiğini belirtmişlerdir. Çalışmamızda kullanılan genotipler arasında en yüksek sürgün uzunluğu 23,5 cm ile bezostaja genotipinden elde edilirken bu genotipi 17,35 cm ile haymana 79 takip ettiği tespit edilmiştir (şekil 7). Uygulanan alüminyum dozları arttıkça oluşan sürgün uzunluğuunda bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Buğday bitkisi ile yaptıkları bir çalışmada, yine artan Alüminyum konsantrasyonlarında bitkide sürgün büyümesinin çalışmamıza benzer şekilde azaldığını rapor etmişlerdir (Basu *et al.* 1994).

Çalışmamızda, kök büyümesi sürgünden daha fazla etkilendiği gözlenmiştir. Benzer şekilde Fageria (1985), Narayana and Syamala (1989) yaptıkları çalışmalarda, kök uzamasının inhibisyonu alüminyum toksisitesinin ilk görünür semptomu olduğunu ve sürgün üzerindeki alüminyumun toksik etkisinin gecikmiş ve dolaylı tepki gösterdiklerini belirtmişlerdir. Çalışmamızda im uzunluğu parametresi ele alındığında genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın çok önemli ($P<0,01$) olduğu gözlenmiştir (Tablo 5). Çalışmamızda kullandđımız genotiplerin arasında en yüksek çim uzunluğu değer 30,77 cm ile Bezostaja genotipinden elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük çim uzunluğu değer 6,5 cm ile İzgi 2001 genotipinde gözlenmiştir (Tablo 7). Uygulanan alüminyum dozları arttıkça oluşan çim uzunluğuunda bir azalma eğilimi gözlenmiştir (şekil 9). Koleoptil uzunluğu parametresi açısından genotipler arası farkın çok önemli ($P<0,01$), farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın ise önemli ($P<0,05$) olduğu belirlenmiştir (Tablo 5). Çalışmamızda kullandđımız genotipler arasında en yüksek koleoptil uzunluğu 2,92 cm ile Mutant hatta gözlenmiştir. Buna karşılık en düşük 0,73 İzgi 2001 genotipinde tespit edilmiştir (Tablo 7). Uygulanan alüminyum dozları ile oluşan koleoptil uzunluğu arasında karmaşık bir ilişkini olduğu gözlenmiştir (şekil 8). Benzer şekilde Aniol (1984) tarafından yapılan bir çalışmada, alüminyum fitotoksitesinin yaş ağırlık, kuru ağırlık, alt yaprak uzunluğu ve koleoptil uzunluğu karakterlerinde azalma ve ayrıca bodur bitki oluşumdan sorumlu olduğunu belirtmişlerdir. Kök yaş ağırlığı parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın istatistiksel olarak çok önemli ($P<0,01$) olduğu gözlenmiştir (Tablo 6). Çalışmamızda kullanılan genotiplerin arasından en yüksek kök yaş ağırlığı 0,268 – 0,267 g ile Demir 2000 ve Bezostaja genotipinde gözlenmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,046 g ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir. Uygulanan alüminyum dozları ile oluşan kök yaş ağırlığı arasında kompleks bir ilişkinin olduğu gözlenmiştir (şekil 10). Çalışmamız kapsamında kullanılan genotiplerin arasında en yüksek sürgün yaş ağırlığı 0,571 g ile Demir 2000 genotipinden elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,046 g ile İzgi 2001 genotipinden

gözlenmiştir (Tablo 8). Uygulanan alüminyum dozları arttıkça oluşan sürgün yaş ağırlığı bir azalma eğilimi gözlenmiştir (Şekil 11). Sürgün yaş ağırlığı parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın çok önemli ($P<0,01$) olduğu gözlenmiştir (Tablo 6). Sürgün kuru ağırlığı parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın istatistiksel olarak çok önemsiz ($P<0,01$) olduğu gözlenmiştir (Tablo 6). Çalışmamızda kullanılan genotipler arasında en yüksek sürgün kuru ağırlığı 0,072 g ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,010 g ile İzgi 2001 genotipinde tespit edilmiştir (Tablo 8). Kök kuru ağırlığı parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki farkın çok önemsiz ($P<0,01$) olduğu gözlenmiştir (Tablo 6). Çalışmamızda kullanılan genotiplerin arasında en yüksek kök kuru ağırlığı 0,71 g ile Mutant hattın elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 0,007 g ile İzgi 2001 genotipinden elde edilmiştir (Tablo 8). Bizim çalışmamıza benzer şekilde, Türkay (2011) yaptığı bir çalışmada, arpa (*Hordeum vulgare* L.) bitkisine 20 gün boyunca alüminyum uygulaması yapmış ve bitki kökünde alüminyum uygulaması sonrası kök kuru ağırlıklarının azaldığını rapor etmiştir. Farklı alüminyum doz uygulamalarının genotiplerin kök ve sürgün kuru ağırlıklarını etkilemiş ve genellikle alüminyum konsantrasyonunun artışı ile azalmıştır. Örneğin, Yang *et al.* (2007), çalışmasında *Pinus massoniana* bitkisini kullanarak Al toksik etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda, Al stresinin sürgün kuru ağırlığını olumsuz etkilediğini rapor etmiştir. Fakat bizim çalışmamızda da alüminyumun toksik etkisi arttıkça tüm genotiplerin kök ve sürgün kuru ağırlıklarında kompleks bir ilişkisi olduğu tespit edilmiştir (Şekil 12. ve Şekil 13.) Literatür taramamızda alüminyum toksisitesinin bitki büyüme parametrelerini olumsuz etkilediği bildirmişlerdir (Foy and Fleming 1978; Aniol *et al.* 1984; Fageria 1985; Foy 1988; Taylor 1988; Narayana and Syamala 1989; Rincon and Gonzales, 1992; Delhaize *et al.* 1993; Kochian 1995; Samuels *et al.* 1997; Yang, *et al.* 2007; Zhao *et al.* 2014; Rahman *et al.* 2018; Liu *et al.* 2018; Sarker *et al.* 2019; Santos *et al.* 2019; Yan *et al.* 2022). Bizim çalışmamızda da alüminyum toksisitesinin olumsuz etkisi gözlenmiştir. Fakat çalışmamızda yapılan fide karakterlerindeki ölçümler, literatür araştırmalarına göre farklılık göstermektedir. Sürgün uzunluğu, çim uzunluğu ve sürgün yaş ağırlığı ölçüm sonuçları literatür araştırmalarında paralellik gösterirken, diğer ölçümü yapılan parametreler farklılık göstermektedir. Kök büyümesi ayrıca ele alındığında alüminyum konsantrasyonu arttıkça genotipler arasında azalanlar olmasının yanında kompleks ilişki gösteren genotiplerde gözlenmiştir.

Yaptığımız çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar ile benzer şekilde Sarker *et al.* (2019) tarafından yapılan araştırmada 5 buğday (Kanchan, Shatabdi, Sourav, Bijoy (BARI-23) ve Sufi (BARI-22)) genotipine ait bitkilerin, çimlenme yüzdesinin, hipokotillerin ve epikotillerin uzunluğunun, kök ve sürgün uzunluğunun, yaprak uzunluğunun, koleoptil uzunluğunun, bitki boyunun, yaş ve kuru ağırlıklarının alüminyum stres koşullarına göre kontrolde daha fazla olduğunu göstermişlerdir.

Çalışmamızda kullandığımız genotiplerin arasında alüminyuma duyarlılık seviyeleri İzgi 2001> Mutant > Kırık > Haymana 79 > Demir 2000> Bezostaja olarak belirlenmiştir. Çalışmamız benzer yapılan araştırmalarda, çimlenme parametreleri kullanılarak genotiplerin alüminyuma duyarlı veya alüminyuma toleranslı olarak sınıflandırılması, genel olarak bir dizi önceki raporla uyumludur (Wallace *et al.* 1982; Campbell and Lafever 1976, 1981; Mugwira *et al.* 1976, 1978, 1981; Mugwira and Elgawhary, 1979; Lafever and Campbell, 1978; Polle *et al.* 1978; Sapra *et al.* 1978; Mugwira and Patel, 1977; Moore *et al.* 1976; Foy *et al.* 1965, 1974; Mesdag and Sloodmaker, 1969; Fleming and Foy, 1968).

Çalışmamızda alüminyum toksisitesinin Hoagland ve Arnon (1938) solüsyonunda ana etkileri, kök büyümesinin ve hassas fidelerin gelişmesi nedeniyle açıkça anlaşılmıştır. Hematoksilen boyama testi, büyük popülasyonlarda çalışırken çok etkilidir ve buğday genetiği ve yetiştirme programlarında alüminyum toleransını karakterize etmek için yaygın kullanılmıştır (Delhaize *et al.* 1993; Hede *et al.* 2001). Çalışmamızda alüminyum toleransında farklılık gösteren Kırık (kontrol) Mutant hat genotiplerine ait fideler, farklı alüminyum konsantrasyonları içeren besin solüsyonlarına kısa süreli bırakıldıktan sonra hematoksilen ile boyanarak ayırt edilmiştir. Çalışmamızda kullandığımız genotipler 17 saat boyunca farklı alüminyum dozlarına maruz bırakıldıktan sonra ve kök uçları hematoksilen ile boyanmıştır. Hematoksilen kök uçlarına zarar vermediği için, fideler önce boyanmış ve daha sonra Al içeren besin solüsyonunda kök büyümesi için tekrar 24 saat boyunca farklı alüminyum konsantrasyonlarına maruz bırakılmıştır. Hematoksilen ile boyanmış alüminyuma duyarlı fidelerin kökleri Hoagland ve Arnon (1938) yetiştirme ortamına aktarıldıktan sonra büyümeye devam etmiştir. Hemetoksilen boyaması sonrası buğday fidelerinin kök uçları filtre kağıdı üzerinde ölçümleri yapıp görsel tahminlerle değerlendirilmiştir. I- çok iyi tolerant, II- iyi tolerant, III- orta tolerant, IV- hassas, V- çok hassas olmak üzere I-V skalasında değerlendirilmiştir. Tip I-II'de fideler büyümeye devam eder, tip III' de fideler ara tepkiye sahiptir ve tip IV-V' de fidelerin kökleri besin solüsyonunda büyümeye devam edemez. Benzer şekilde Konzak *et al.* (1976) yaptıkları çalışmada, bir filtre kağıdı-çözelti yöntemi kullanarak, farklı genotipleri, kök ölçümleri ve kök büyümesinin görsel tahminleri ile dört farklı

alüminyum toleransı seviyesinde de sınıflandırdıklarını belirtmişlerdir. Alüminyuma duyarlı fideler daha yoğun boyanırken, aynı şekilde uygulamaya maruz kalan alüminyuma toleranslı fideler ise çok az boyama göstermiştir. Hassas hatların kök uçlarında Al toksisitesinin büyük etkileri belirginleşmeden önce hematoksil boyama ile tanımlanmıştır. Hematoksil boyama testi kullanılarak elde edilen alüminyum toleransına ilişkin fenotipik değerleri Tablo 9 ve Tablo 10’ da verilmiştir. Kök ucu boyama parametresi açısından genotipler ve farklı alüminyum doz uygulamaları arasındaki fark önemli ($P<0,05$) bulunmuştur. Genotip x doz intreaksiyonuna bakıldığında farkın önemsiz olduğu anlaşılmıştır. Denemede kullanılan genotiplerin ortalama kök ucu boyama değerleri en fazla 3.5 değeri ile Kırık (kontrol) genotipinden elde edilmiştir. Buna karşılık, en az 2.8 değeri ile Mutant hattın elde edilmiştir. Deneme kapsamında en fazla boyanma değeri 30 mM uygulaması vermiştir. En az boyanma değerini ise kontrol (0 mM) uygulaması vermiştir (Tablo 10). Kırık genotipinin daha yoğun boyanması (Şekil 14 ve Şekil 15) neticesinde alüminyum toksisitesine duyarlı olduğu anlaşılmıştır. Mutant hattın kök uçlarının az boyanması (Şekil 16 ve Şekil 17) sonucunda alüminyum toksisitesine toleranslı olduğu anlaşılmıştır. Benzer şekilde Delhaize *et al.* (1993) tarafından yapılan bir çalışmada farklı alüminyum konsantrasyonlarına maruz kalan bitkilerin hematoksil boyama ile tolerans seviyelerinin belirleneceğinden bahsetmişlerdir.

Kullandığımız genotiplerin kökleri, hematoksil boyama işleminde, alüminyum konsantrasyonu arttıkça ortak bir boyama modeli geliştirmiştir. Düşük alüminyum konsantrasyonlarında boyanabilir bölge kök ucuna yakın boyanmamıştır. Alüminyum konsantrasyonu arttıkça, kökün daha fazla kısmı boyanmıştır. Çalışmamızda test edilen genotiplerin boyamaya tepkisi, büyük ölçüde fide kökünün uzunluğundan bağımsızdır. Benzer şekilde Polle *et al.* (1978) tarafından yapılan bir çalışmada, buğday bitkisinin boyamaya tepkisinin kök uzunluğundan bağımsız olduğundan bahsetmişlerdir. Daha önce yapılan bir çalışmada kullanılan hematoksil boyama taramasının tarla koşullarında genotiplerin asitli topraklara toleransı yansıtmayabileceği belirtilmiştir. Bunun nedeni asitli toprakların bitkilere sadece alüminyum toksisitesi değil birden fazla stres oluşturmaları ve bu diğer streslere karşı bu genetik varyasyonun bitkilerin genel performansını etkileyeceğidir (Ryan 2018).

SONUÇ VE ÖNERİLER

- Çalışmamızda sonuç olarak, hidroponik solüsyonda yetiştirilen buğday fidelerine uygulanan farklı alüminyum dozlarının, kök sayısı, kök uzunluğu, sürgün uzunluğu, koleoptil uzunluğu, çim uzunluğu, kök yaş ağırlığı, sürgün yaşa ağırlığı, kök kuru ve sürgün kuru ağırlığı gibi fide karakterlerinin üzerine etkili olduğu anlaşılmıştır.
- Alüminyum kaynaklı stres belirtileri, hidroponik sistem içerisindeki bitkilerde dördüncü ve beşinci günde başladığı gözlenmiştir.
- Ölçümlerin sonucunda alüminyum toksisitesinin kök büyümesine direkt, sürgün büyümesine ise dolaylı etki ettiği anlaşılmıştır.
- Nispeten daha düşük alüminyum doz uygulamalarında, fidelerin kök ve sürgün büyümeleri üzerinde uyarıcı etki gösterdiği belirlenmiştir.
- Uygulanan alüminyum dozları artıkça, sürgün uzunluğu, çim uzunluğu ve sürgün yaş ağırlığında azalma gözlenirken diğer parametreler de ise karmaşık bir ilişki gözlenmiştir.
- Çalışmamızda kullandığımız genotiplerin arasında alüminyuma duyarlılık seviyeleri İzgi 2001> Mutant > Kırık > Haymana 79 > Demir 2000> Bezostaja olarak belirlenmiştir.
- Ayrıca genotiplerin alüminyum stresine karşı çimlenme döneminde ve fide gelişimi döneminde farklı tepki gösterdikleri anlaşılmıştır.
- Çalışmamızda hematoksilin boyama sonuçlarına baktığımızda, alüminyuma duyarlı fidelerin kökleri daha yoğun boyanırken, aynı şekilde uygulamaya maruz kalan alüminyuma toleranslı fidelerin kökleri ise daha az boyanma göstermiştir.
- Çalışmamızda kullandığımız Kırık genotipi ve Mutant hattın elde ettiğimiz verilere göre Kırık genotipinin daha yoğun boyanması ile alüminyum toksisitesine duyarlı olduğu anlaşılmıştır.
- Mutant hattın kök uçlarının az boyanması sonucunda ise alüminyum toksisitesine toleranslı olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Akkaya, A., 1994. Buğday yetiştiriciliği, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üni. Genel Yayın No :1, Ziraat Fakültesi Genel Yayın No:1, Kahramanmaraş. sayfa 1-210
- Alamgir, A. N. M., Akhter, S. 2009. Effects of aluminium (Al^{3+}) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Bangladesh Journal of Botany*, 38(1), 1-6.
- Aniol, A., 1984. Introduction of aluminum tolerance into aluminum-sensitive wheat cultivars, *Z. Pflanzenzücht*, 93, 331-339.
- Anonim 2022b. <https://www.ctb.org.tr/bugday-arpa-da-gubreleme/> Erişim; 23.05.2022 14:45
- Anonim 2015a. Buğday yetiştiriciliği. 2015. T.C. ANKARA VALİLİĞİ İl Gıda Tarım ve Hayvancılık Müdürlüğü. Erişim; 23.05.2022 13:32
- Anonim 2022c <https://docplayer.biz.tr/47968376-Bitkilerde-buyume-gelisme-ve-stres-kavrami.html> Erişim; 27.06.2022 17:20
- Aydın, A., 2014. Bazı Ekmeklik Buğday Genotiplerinin Alüminyum Stresine toleranslarının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Erzurum.
- Barnhisel, R., and Bertsch, P. M., 1983. Aluminum. Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties, *Agronomy Monographs*, 9, 275-300.
- Basu, U., Godbold, D., Taylor, G.J., 1994. Aluminium resistance in *Triticum aestivum* associated with enhanced exudation of malate . *J. Plant Physiol* . 144, 747-753.
- 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.
- Brunner, I., and Sperisen, C., 2013. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. *Frontiers in Plant Science*, 4, 172.
- Campbell, L. G., and Lafever, H. N., 1976. Correlation of field and nutrient culture techniques of screening wheat for aluminum tolerance. In M. J. Wright and S. A. Ferrari [eds.], *Plant adaptation to mineral stress in problem soils*, pp. 277-286. Cornell Univ. Agric. Exp. Stn., Ithaca, N. Y.
- Cassells, A. C., and Curry, R. F. (2001). Oxidative stress and physiological, epigenetic and genetic variability in plant tissue culture: implications for micropropagators and genetic engineers. *Plant cell, tissue and organ culture*, 64(2), 145-157.3
- Chauhan, D. K., Yadav, V., Vaculík, M., Gassmann, W., Pike, S., Arif, N., and Tripathi, D. K., 2021. Aluminum toxicity and aluminum stress-induced physiological tolerance responses in higher plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(5), 715-730.
- Cohen, J.; Slessarev, 2016. E. Soil pHertility: The Current; University of California: Santa Barbara, CA, USA. Available online: <http://www.news.ucsb.edu/2016/017434/soil-fertility> (accessed on 3 june 2022).

- Dai, S. F., Yan, Z. H., Liu, D. C., Zhang, L. Q., Wei, Y. M., and Zheng, Y. L., 2009. Evaluation on chinese bread wheat landraces for low pH and aluminum tolerance using hydroponic screening. *Agricultural Sciences in China*, 8(3), 285-292..
- Delhaize, E., Craig, S., Beaton, C. D., Bennet, R. J., Jagadish, V. C., and Randall, P. J., 1993. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.)(I. Uptake and distribution of aluminum in root apices). *Plant Physiology*, 103(3), 685-693.
- Delhaize, E., Ryan, P. R., and Randall, P. J., 1993. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.)(II. Aluminum-stimulated excretion of malic acid from root apices). *Plant Physiology*, 103(3), 695-702.
- Fageria, N. K., 1985. Influence of aluminum in nutrient solutions on chemical composition in two rice cultivars at different growth stages. *Plant and Soil*, 85(3), 423-429.
- Fleming, A. L., and Foy, C. D., 1968. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties 1. *Agronomy Journal*, 60 (2), 172-176
- Foy, C. D., Armiger, W. H., Briggles L. W., and Reid D. A., 1965. Differential Aluminum Tolerance of Wheat and Barley Varieties in Acid Soils 1. *Agronomy Journal*, 57(5), 413-417.
- Foy, C.D., 1988. Plant adaptation to acid, aluminium toxic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19: 959-987.
- Foy, C.D., and Fleming, A.L., 1978. Aluminium tolerance of two wheat cultivars related to nitrate reductase activities. *Journal of Plant Nutrition*, 9, 1313-1333.
- Frantzios, G., Galatis, B., and Apostolakis, P., 2001. Aluminium effects on microtubule organization in dividing root-tip cells of *Triticum turgidum*. II. Cytokinetic cells. *Journal of Plant Research*, 114(2), 157-170.
- Gaspar, T., Franck, T., Bisbis, B., Kevers, C., Jouve, L., Hausman, J. F. and Dommes, J., 2002. Concepts in plant stress physiology. Application to plant tissue cultures, *Plant Growth Regulation*, 37, 263-285.
- Hede, AR., Skovmand, B., Lopez Cesati, J., 2001. Acid soils and aluminum toxicity. In: Reynolds MP, Ortiz-Monasterio I, McNab A (eds) *Application of physiology in wheat breeding*. CIMMYT, Mexico City, pp 172–182
- Hoagland, D. R. and Arnon, D. I., 1938. Growing plants without soil by the water-culture method. *Growing plants without soil by the water-culture method*. CAB Direct
- Kichigina, N. E., Puhalsky, J. V., Shaposhnikov, A. I., Azarova, T. S., Makarova, N. M., Loskutov, S. I., and Belimov, A. A., 2017. Aluminum exclusion from root zone and maintenance of nutrient uptake are principal mechanisms of Al tolerance in *Pisum sativum* L. *Physiology and molecular biology of plants*, 23(4), 851-863.
- Kim, B. Y., Baier, A. C., Somers, D. J., and Gustafson, J. P., 2002. Aluminum tolerance in triticale, wheat, and rye. In *Mutations, In Vitro and Molecular Techniques for Environmentally Sustainable Crop Improvement*, SpringerLink, pp. 101-111
- Klug, B., and Horst, W. J., 2010. Oxalate exudation into the root-tip water free space confers protection from aluminum toxicity and allows aluminum accumulation in the symplast in buckwheat *Fagopyrum esculentum*. *New Phytologist*, 187(2), 380-391.
- 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. *Annual review of plant biology*, 55(1), 459-493.

- Kochian, L. V., Piñeros, M. A., and Hoekenga, O. A., 2005. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant Soil*, SpringerLink, 274, 175–195.
- Kochian, L. V., Pineros, 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., 1995. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 46: 237-260.
- Konzak, C. F., Polle, E., and Kittrick, J. A., 1976. Screening several crops for aluminum tolerance. In *Plant adaptation to mineral stress in problem soils. Proceedings of a workshop held at the National Agricultural Library, Beltsville, Maryland, November 22-23*, pp. 311-327, Cornell Univ. Agricultural Experiment Station.
- Kurtuluş, G., 2019. *Buğday (Triticum aestivum L.)’da Alüminyum Toksisitesine Karşı Kitosan Uygulamasının Etkileri*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, sf. 1-62
- Lafever, H. N., and Campbell, L. G., 1978. Inheritance of aluminum tolerance in wheat. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*, 20(3), 355-364.
- Li, J., Xie, C. J., Yu, Y. X., and Yang, X. Y., 2016. The progress in study on plant aluminum resistance mechanism. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 12(6), 16–21.
- Lin, Y. M., Wang, Q. L., Wang, C. X., Cui, X. M., Zhao, Z. Q., and Yang, Y., 2015. Overview on research of Al-induced plant organic acid secretion. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 30(4), 634–641
- Liu, J., Zhou, M., Delhaize, E., and Ryan, P. R., 2017. Altered expression of a malate-permeable anion channel, OsALMT4, disrupts mineral nutrition. *Plant Physiology*, 175(4), 1745-1759.
- Liu, W., Xu, F., Lv, T., Zhou, W., Chen, Y., Jin, C., and Lin, X., 2018. Spatial responses of antioxidative system to aluminum stress in roots of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants. *Science of the Total Environment*, 627, 462-469.
- Ma, J. F., Ryan, R.P., and Delhaize, E., 2001. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *Trends in plant science*, 6(6), 273-278.
- McLean, E. O., 1976. Chemistry of soil aluminum. *Communications in soil science and plant analysis*, 7(7), 619-636
- Mesdag, J., and Slootmaker L. A. J., 1969. Classifying wheat varieties for tolerance to high soil acidity. *Euphytica* 18: 36-42.
- Moore, D. P., Kronstad, W. E., and Metzger, R. J. 1976. Screening wheat for aluminum tolerance. In M. J. Wright, and S. A. Ferrari [eds.], *Plant adaptation to mineral stress in problem soils*. Cornell Univ. Agric. Exp. Stn., Ithaca, N. Y. pp. 287-295.
- Morris, C. F., and Rose, S. P., 1996. Wheat. *Cereal grain quality*, 3-54.
- Mugwira, L. M., and Elgawhary, S. M., 1979. Aluminum accumulation and tolerance of triticale and wheat in relation to root cation exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43: 736-740.
- Mugwira, L. M., and PATEL, S. U., 1977. Root zone pH changes and ion uptake imbalances by triticale, wheat and rye. *Agron. J.* 69: 719-722.
- Mugwira, L. M., Elgawhary, S. M., and Patel K. I., 1976. Differential Tolerances of Triticale, Wheat, Rye, and Barley to Aluminum in Nutrient Solution 1. *Agronomy Journal*, 68(5), 782-787.

- Mugwira, L. M., Elgawhary, S. M., and Patel, S. U., 1978. Aluminium tolerance in triticale, wheat and rye as measured by root growth characteristics and aluminium concentration. *Plant and Soil*, 50(1), 681-690
- Mugwira, L. M., Sapra, V. T., Patel, S. U. and Choudhry, M. A., 1981. Aluminum Tolerance of Triticale and Wheat Cultivars Developed in Different Regions 1. *Agronomy Journal*, 73(3), 470-475.
- Narayanan, A., and Sayamala, R., 1989. Response of pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) genotypes to aluminium toxicity. *Indian J. Plant Physiol.* 32: 17-24.
- Polle, E., Konzak, C. F., and Kattrick, J. A. 1978. Visual detection of aluminum tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots 1. *Crop Science*, 18(5), 823-827.
- Pour, A., 2016. Kimyasal Mutagen Uygulamalarının Buğdayda Bazı İn Vitro Karakterler Ve Kuraklığa Tolerans Üzerine Etkileri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi.
- Rahman, M. A., 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), 3073.
- Rahman, R., and Upadhyaya, H., 2021. Aluminium toxicity and its tolerance in plant: A review. *Journal of Plant Biology*, 64(2), 101-121.
- Rajaram, S., and Villegas, E., 1990. Breeding wheat (*Triticum aestivum* L.) for aluminium toxicity tolerance at CIMMYT. In *Genetic aspects of plant mineral nutrition*. Springer, Dordrecht. pp. 489-495.
- Riaz, M., Yan, L., Wu, XW., Hussain, S., Aziz, O., and Jiang, CC., 2018. Mechanisms of organic acids and boron induced tolerance of aluminum toxicity: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 165, 25-35.
- Rincon, M., and Gonzales, R. A., 1992. Aluminum Partitioning in Intact Roots of Aluminum-Tolerant and Aluminum-Sensitive Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars, *Plant Physiol.* 99: 1021-1028.
- Ryan, P. R., Delhaize, E., and Randall, P. J., 1995. Malate efflux from root apices and tolerance to aluminium are highly correlated in wheat. *Functional Plant Biology*, 22(4), 531-536.
- Ryan, P. R., Delhaize, E. and Randall, P. J., 1995. Characterisation of Al-stimulated efflux of malate from the apices of Al-tolerant wheat roots. *Planta*, 196(1), 103-110.
- Ryan, P., 2018. Assessing the role of genetics for improving the yield of Australia's major grain crops on acid soils. *Crop Pasture Sci* 69:242–264
- 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(2), 187-210.
- Samuels, T. D., Kucu Kakyuz, K., and Rincon-Zachary, M., 1997. Al partitioning patterns and root growth as related to Al sensitivity and Al tolerance in wheat. *Plant Physiol.* 113(2): 527-534.
- Santos, E., Pinto-Carnide, O., Figueiras, AM., Benito, C., and Matos, M., 2019. Biochemical, physiological and genetic analysis of aluminum tolerance of different rye species. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 87-94.

- Sapra, V. T., Mugwira, L. M., Choudhry, M. A., and Hughes J. L., 1978. Screening of triticale, wheat and rye germ plasm for aluminum tolerance in soil and nutrient solution. In S. Ramanujam [ed.], Proc. 5th Int. Wheat Genet. Symp. New Delhi, India. pp. 1241-1253.
- Sarker, S. C., Ghosh, S. R., Hossain, M. J., Ghosh, R. C., Razia, S., Sushmoy, D. R., and Noor, M. M. A., 2019. Impact of aluminium (Al³⁺) stress on germination and seedling growth of five wheat genotypes. *SAARC Journal of Agriculture*, 17(1), 65-76.
- Sasaki, T., Tsuchiya, Y., Ariyoshi, M., Nakano, R., Ushijima, K., Kubo, Y., and Yamamoto, Y., 2016. Two members of the aluminum-activated malate transporter family, SIALMT4 and SIALMT5, are expressed during fruit development, and the overexpression of SIALMT5 alters organic acid contents in seeds in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Plant and Cell Physiology*, 57(11), 2367-2379.
- Shewry, P. R., 2009. Wheat. *Journal of experimental botany*, 60(6), 1537-1553.
- Silva, C. M. S., Zhang, C., Habermann, G., Delhaize, E., and Ryan, P. R., 2018. Does the major aluminium-resistance gene in wheat, TaALMT1, also confer tolerance to alkaline soils?. *Plant and Soil*, Springer, 424(1), 451-462.
- Tamás, L., Budíková, S., Huttová, J., Mistrík, I., Šimonovičová, M., and Šíroká, 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(3), 189-194.
- Taylor, G.J., 1988. Mechanism of aluminium tolerance in *Triticum aestivum* L. nitrogen nutrition, plant induced pH and tolerance to aluminium: correlation without causality. *Can. J. Bot.* 66: 694-699.
- TÜİK, 2021. Buğday Üretim. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri202137249anddil=1#:~:text=Bir%20%C3%B6nceki%20y%C4%B1la%20g%C3%B6re%20bu%C4%9Fday,yakla%C5%9F%C4%B1k%206%2C8%20milyon%20ton. Ertişim; 23.05.2022 14:30>
- USDA., 2022. <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usdaesmis/files/zs25x844t/tx31rd50m/n296xt95q/grain.pdf>. Erişim 24.05.2022 13:13.
- Vitarello, 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.
- Wallace, S. U., Henning, S. J., and anderson, I. C., 1982. Elongation, Al concentration and hematoxylin staining of aluminum-treated wheat roots. *Iowa State J. Res.* 57: 97-106
- Wang, JP., Raman, H., Zhang, GP., Mendham, N., and Zhou, MX., 2006. Aluminium tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.): physiological mechanisms, genetics and screening methods. *Journal of Zhejiang University Science B*, 7(10), 769-787.
- Xu, M., Gruber, B. D., Delhaize, E., White, R. G., James, R. A., You, J., Yang, Z., and Ryan, P. R., 2015. The barley anion channel, HvALMT1, has multiple roles in guard cell physiology and grain metabolism. *Physiologia plantarum*, 153(1), 183-193.
- Yağdı, K., KAÇAR, O., ve AZKAN, N., 2000. Topraklardaki ağır metal sertliği ve muayeneleri. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi (Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi)* , 15(2), 109-115.
- Yan, L., Riaz, M., Liu, J., Yu, M., and Cuncang, J., 2022. The aluminum tolerance and detoxification mechanisms in plants; recent advances and prospects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(9), 1491-1527.

- Yang, J. L., Zhu, X. F., Peng, Y. X., Zheng, C., Li, G. X., Liu, Y., Shi, Y. Z., and Zheng, S. J., 2011. Cell wall hemicellulose contributes significantly to aluminum adsorption and root growth in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 155(4), 1885–1892.
- Yang, Q., Wang, Y., Zhang, J., Shi, W., Qian, C., and Peng, X., 2007. Identification of aluminum-responsive proteins in rice roots by a proteomic approach: Cysteine synthase as a key player in Al response. *Proteomics*, 7(5), 737–749.
- Zhang, Y., Fu, L., Bao, Y., Qiao, Y.X., Wang, J.H., Zhang, H.X., and Chen, C., 2017. Research on stress response and resistance of root border cells in higher plants. *Northern Horticulture*, (24), 189-193.
- Zhao, X. Q., Chen, R. F., and Shen, R. F., 2014. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils. *Soil science*, 179(10-11), 503-513.
- Zheng, S. J., Yang, J. L., He, Y. F., Yu, X. H., Zhang, L., Sen, J. F., Shen, R. F., and Matsumoto, H., 2005. Immobilization of aluminum with phosphorus in roots is associated with high aluminum resistance in buckwheat. *Plant Physiology*, 138(1), 297-303.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Seda MELİK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Şanlıurfa Esentepe İMKB Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Ziraat Mühendisliği
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ziraat Mühendisliği, Tarla Bitkileri Anabilim Dalı
Doktora:	-
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	-
Almanca:	-
Rusça:	-
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
-	