



***Lythrum salicaria* L. BİTKİSİNİN BOR AKÜMÜLASYON
KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa Haitham Mohammed AL-BASSAM

Kütahya - 2023

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Biyoloji Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

***Lythrum salicaria* L. BİTKİSİNİN BOR AKÜMÜLASYON
KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ**

Danışman:
Dr. Öğr. Üyesi Nüket AKANIL BİNGÖL
Dr. Öğr. Üyesi Betül AKIN

Hazırlayan:
Mustafa Haitham Mohammed AL-BASSAM

Kütahya – 2023

Kabul ve Onay

Biyoloji Ana bilim dalında, 801910110107 öğrenci numaralı, Mustafa Haitham Mohammed AL-BASSAM'ın hazırlamış olduğu “*Lythrum salicaria* L. BİTKİSİNİN BOR AKÜMÜLASYON KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ” başlıklı yüksek lisans tez çalışması ile ilgili tez savunma sınavı jüri tarafından yapılmış ve adayın tezinin OY BİRLİĞİ ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

17/01/2023

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Red
Dr. Öğr. Üyesi Nüket AKANIL BİNGÖL (Danışman)		
Dr. Öğr. Üyesi Betül AKIN (Ortak Danışman)		
Doç. Dr. Harun BÖCÜK		
Doç. Dr. Burcu ÇETİN		

Onay

Doç. Dr. Arif KOLAY

Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım “*Lythrum salicaria* L. Bitkisinin Bor Akümülyasyon Kapasitesinin Belirlenmesi” adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

17/01/2023

Mustafa Haitham Mohammed AL-BASSAM

Özgeçmiş

Lise eğitimini, Irak/Bağdat Damascus lisesinde tamamlamıştır. Lisans eğitimini, Almustansiriyah Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Anabilim Dalında tamamlamıştır. Yüksek Lisans derecesini, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalında tamamlamıştır. İş deneyimi, 2007-2016 petrol sektöründe "Midland Refineries Company" de çalışmıştır.



ÖZET

***Lythrum salicaria* L. BİTKİSİNİN BOR AKÜMÜLASYON KAPASİTESİNİN BELİRLENMESİ**

AL-BASSAM, Mustafa Haitham Mohammed

Yüksek Lisans Tezi, Biyoloji Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Nüket AKANIL BİNGÖL

Dr. Öğr. Üyesi Betül AKIN

Şubat, 2023, 62 sayfa

Bu çalışmada, farklı bor (B) konsantrasyonlarının (0; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2; 3; 4; 5; 8; 9; 10; 20; 30; 40; 50; 75 ve 100 mg B/L) *L. salicaria* L. bitkisinin nisbi kök ve gövde uzunluğu, taze ağırlığı ve yaprak klorofil miktarı üzerine etkisi ve bitkinin B fitoremediasyonundaki kullanılabilirliği hidroponik kültür ortamında araştırılmıştır. Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen bitkinin nisbi kök uzunluğu (%), nisbi gövde uzunluğu (%) ve nisbi yaş ağırlığı (%) ile artan B konsantrasyonu arasında istatistiksel olarak negatif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($r=-0,67$; $r=-0,94$; $r=-0,88$, sırasıyla). Elde edilen sonuçlara göre, *L. salicaria* bitkisinin en iyi gelişim gösterdiği B konsantrasyonun 0,4 mg B/L olarak belirlenmiştir. Ayrıca, solüsyonlardaki B konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak *L. salicaria* yaprak klorofil a ve toplam klorofil miktarında azalma tespit edilmiştir ($r=-0,85$ ve $r=-0,79$, sırasıyla).

Akümülayon çalışmalarından elde edilen verilere göre, farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen *L. salicaria* fidelerinin akümüle ettiği B miktarı istatistiki açıdan farklılık göstermiştir ($F=219,3$; $p<0,0001$). Bitkinin B'yi en iyi akümüle ettiği konsantrasyon 0,6 mg/L (51,5 mg B/kg $\pm$ 0,06) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde bu çalışmada *L. salicaria* türünün düşük B konsantrasyonlarında B'yi dokularında akümüle edebilme yeteneğinden dolayı, fitoremediasyon çalışmalarında kullanılabilecek bitkiler arasında yerini almasına katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Akümülayon, Bor, Fitoremediasyon, Klorofil Miktarı, *Lythrum salicaria*

ABSTRACT**BORON ACCUMULATION CAPACITY OF *Lythrum salicaria* L. PLANT**

AL-BASSAM, Mustafa Haitham Mohammed
Master Thesis, Department of Biology
Supervisor: Asst Prof. Nüket AKANIL BİNGÖL
Asst. Prof. Betül AKIN
February, 2023, 62 pages

In this study, the effects of different boron (B) concentrations (0; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2; 3; 4; 5; 8; 9; 10; 20; 30; 40; 50; 75 ve 100 mg B/L) on the relative root and stem length, fresh weight and leaf chlorophyll amount of *L. salicaria* L. plant and the usability of the plant in B phytoremediation were investigated in hydroponic culture. It was determined that there was a statistically negative relationship between the relative root length (%), relative stem length (%) and relative fresh weight (%) of the plant grown at different B concentrations and increasing B concentration ($r=-0.67$; $r=-0.94$; $r=-0.88$, respectively). According to the results obtained, the B concentration where the *L. salicaria* plant showed the best development was found as 0.4 mg B/L. In addition, a decrease in *L. salicaria* leaf chlorophyll a and total chlorophyll amount was determined due to the increase in B concentration in the solutions ($r=-0.85$ and $r=-0.79$, respectively).

According to the data obtained from the accumulation studies, the amount of B accumulated by *L. salicaria* seedlings grown at different B concentrations differed statistically ($F=219.3$; $p<0.0001$). The concentration at which the plant accumulated B best was calculated as 0.6 mg/L. When all the results obtained from this study are evaluated, it will contribute to the *L. salicaria* species to take its place among the plants that can be used in phytoremediation studies due to its ability to accumulate B in low B concentrations in its tissues.

Keywords: Accumulation, Boron, Chlorophyll Content, *Lythrum salicaria*, Phytoremediation

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı hazırlarken geçirdiğim süreç boyunca yardımlarını esirgemeyen, kıymetli zamanını bana ayırarak katkılarıyla beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Nüket AKANIL BİNGÖL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu süreç boyunca benden motivasyon ve desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Betül AKIN'a, tezin hazırlanmasında yardımlarına başvurduğum yüksek lisans arkadaşlarım; Tuba Karaman, Cüheyda Bulman, Mikail Tilkioğlu ve Ezgi Nur Karahan'a teşekkür ederim. Bu tezin başından sonuna kadar beni destekleyen aileme ayrıca teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
GİRİŞ	1

BİRİNCİ BÖLÜM

BOR REZERVLERİ, ÖNEMİ VE FİTOREMEDİASYONU

1.1. BOR ELEMENTİ, BOR REZRVLERİ ve KULLANIM ALANLARI	3
1.2. BOR ve BİTKİLER	7
1.3. ATIK SULARIN TEMİZLENME YÖNTEMLERİ ve FİTOREMEDİASYON (YEŞİL İSLAH)	8
1.3.1. Fitoekstraksiyon.....	10
1.3.2. Rizofiltrasyon	10
1.3.3. Fitostabilizasyon	10
1.3.4. Fitovolatilizasyon	10
1.3.5. Fitodegradasyon.....	10
1.3.6. Rizodegradasyon.....	10
1.4. BOR FİTOREMEDİASYONU	11

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

2.1. <i>Lythrum salicaria</i> L. (KIRMIZI HEVHULMA).....	16
2.2. <i>L. salicaria</i> TOHUMLARININ TOPLANMASI	17
2.3. <i>L. salicaria</i> TOHUMLARININ ÇİMLENDİRİLMESİ ve YETİŞTİRİLMESİ....	17
2.4. FİTOREMEDİASYON DENEYLERİ.....	18
2.5. <i>L. salicaria</i> FİDELERİNİN KLOROFİL ANALİZLERİ.....	19
2.6. <i>L. salicaria</i> FİDELERİNİN BOR ANALİZLERİ	20
2.7. ELDE EDİLEN VERİLERİN İSTATİKSEL ANALİZLERİ	21

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM**ARAŞTIRMA BULGULARI**

3.1. BULGULAR	23
----------------------------	-----------

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**TARTIŞMA**

4.1. TARTIŞMA VE SONUÇ	35
-------------------------------------	-----------

KAYNAKÇA	39
-----------------------	-----------

DİZİN	49
--------------------	-----------



TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1.1: Ükelere Göre Dünya B Rezervleri.....	5
Tablo 1.2: Bazı Hiperakümülatör Bitki Türleri.....	11
Tablo 1.3: B Akümülasyonunda Kullanılan Bazı Bitki Türleri	13
Tablo 3.1: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fidelerinin Büyüme Parametreleri.....	26
Tablo 3.2: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fidelerinin Pigment İçeriği.	29



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Dünya Üzerindeki Ticari Öneme Sahip B Rezervlerinin Dağılım Haritası.	5
Şekil 1.2: Dünyada Sektörel Bazda B Ürünlerinin Tüketimi.	6
Şekil 1.3: Bor Toksisitesi.....	8
Şekil 2.1: <i>L. salicaria</i> Genel Görünümü.....	16
Şekil 2.2: <i>L. salicaria</i> Tohumları Çimlendirme Testi.....	17
Şekil 2.3: Viollerdeki <i>L. salicaria</i> Fideleri.....	18
Şekil 2.4: Hidroponik Ortama Aktarılan <i>L. salicaria</i> Fideleri.....	19
Şekil 2.5: <i>L. salicaria</i> Klorofil Deneyleri.....	21
Şekil 3.1: <i>L. salicaria</i> Tohum Çimlenmesi.....	23
Şekil 3.2: (a) 5 mg/L, (b) 8 mg/L, (c) 9 mg/L, (d) 10 mg/L, (e) 20 mg/L, (f) 30 mg/L, (g) 40 mg/L, (h) 50 mg/L, (i) 75 mg/L ve (j) 100 mg/L B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fidelerinde Görülen Kloroz ve Nekroz.	24
Şekil 3.3: (a) 0 mg/L (kontrol), (b) 0,4 mg/L, (c) 0,6 mg/L, (d) 0,8 mg/L, (e) 1 mg/L, (f) 1,5 mg/L, (g) 2 mg/L, (h) 3 mg/L ve (i) 4 mg/L B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fideleri.	25
Şekil 3.4: Artan B Konsantrasyonu İle <i>L. salicaria</i> Bitkisinin Nisbi Kök Uzunluğu Arasındaki Korelasyon ($r = -0,67$).....	27
Şekil 3.5: Artan B Konsantrasyonu İle <i>L. salicaria</i> Bitkisinin Nisbi Gövde Uzunluğu Arasındaki Korelasyon ($r = -0,94$).....	28
Şekil 3.6: Artan B Konsantrasyonu İle <i>L. salicaria</i> Bitkisinin Nisbi Taze Ağırlığı Arasındaki Korelasyon ($r = -0,88$).....	28
Şekil 3.7: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fide Yapraklarının Klorofil a Miktarı.	30
Şekil 3.8: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fide Yapraklarının Klorofil b Miktarı.	31
Şekil 3.9: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fide Yapraklarının Toplam Klorofil Miktarı.....	31
Şekil 3.10: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fide Yapraklarının Karotenoid Miktarı.	32

Şekil 3.11: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen <i>L. salicaria</i> Fidelerinin B Akümülyasyon Miktarı (mg/kg).....	33
---	----





TEZ METNİ

GİRİŞ

Problem durumu: yeryüzündeki insan nüfusu, içinde bulunduğumuz 2023 yılında 8 milyara yaklaşmıştır. Dünya nüfusundaki bu artış ve gelişen teknoloji ile beraber doğaya bırakılan atıklar hava, toprak ve su gibi doğal kaynaklarımızın kirlenmesine sebep olmaktadır. Su kirliliği küresel bazda ilk sıralarda yer alan çevre sorunu olması sebebiyle, bilim insanlarının atık suların temizlenmesine yönelik çalışmaları artmış, özellikle çevre dostu ve düşük maliyetli olan ve yeşil ıslah olarak bilinen fitoremediasyon çalışmaları günümüzde hız kazanmıştır.

Dünya bor (B) rezervleri içinde Türkiye'nin payı yaklaşık %73'dür. Emet-Kütahya B yatakları ise bu rezervin %55'ine katkı sağlamaktadır. Kütahya sanayisinde önemli bir yeri olan B minerali bu bölgede yer alan tatlı sularda kirliliğe sebep olmaktadır.

Araştırmanın amacı: bu tezin amacı, bir sulak alan bitkisi olan *Lythrum salicaria* L.'nin B elementinin fitoremediasyonun daki kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu kapsamda, B elementinin bitkinin bazı büyüme parametreleri ve yaprak klorofil miktarları üzerine etkileri ile bitkinin B akümülyasyon kapasitesinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Araştırmanın önemi: Maliyetinin düşük ve çevre dostu olması nedeni ile son yıllarda suların temizlenmesinde kullanılan bir teknik olan fitoremediasyon yöntemi, suda bulunan kirletici unsurların yeşil bitkiler aracılığı ile temizlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Sulardan B'nin temizlenmesinde farklı bitkiler kullanılmakla birlikte, bu tezde ilk defa L. salicaria bitkisinin B'nin fitoremediasyonunda kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.



BİRİNCİ BÖLÜM
BOR REZERVLERİ, ÖNEMİ VE FİTOREMEDİASYONU

1.1. BOR ELEMENTİ, BOR REZERVLERİ ve KULLANIM ALANLARI

Su, tüm canlılar için vazgeçilmez bir bileşiktir. Yeryüzündeki suların %97'sini tuzlu (denizler ve okyanuslar), %3'ünü de tatlı su kaynakları oluşturmakta olup (buzullar, yeraltı suları, göller ve nehirler), bu tatlı su kaynaklarının çok küçük bir kısmı (%0.3'ü) içme suyu olarak kullanılmaktadır (Arslan, 2019). Su fakiri ülke olma yolunda ilerleyen ülkemizin su potansiyeli değerlendirildiğinde; ortalama yıllık yağış miktarı yaklaşık 501 milyar m³ olup, bunun 158 milyar m³'ü yağışla denizlere, göllere ya da akarsulara taşınırken, 274 milyar m³'ü yine denizlerin, göllerin ve akarsuların buharlaşması ile atmosfere tekrar geri dönmektedir. Geriye kalan 69 milyar m³ ise yeraltı sularımızı oluşturmaktadır. Bunların dışında ülkemize komşu ülkelerden, Meriç ve Asi gibi nehirler yoluyla, yılda yaklaşık 7 milyar m³ tatlı su girişi olmaktadır (Akın ve Akın, 2007; Usta, 2016). Ülkemizde su kaynaklarının yeterliliği açısından şimdilik bir problem bulunmamakla birlikte, özellikle küresel bazda antropojenik bazı faaliyetler sonucu var olan su kaynaklarımız kirlenmektedir. Su kirliliğine neden olan bu antropojenik faaliyetler arasında; tarımsal faaliyetler, endüstriyel faaliyetler sonucu açığa çıkan ağır metaller, sanayi atıkları, geri dönüştürülemeyen çöpler ve maden arama faaliyetleri yer almaktadır (Nassouhi, vd., 2018). Su kaynaklarının fiziksel, kimyasal, radyoaktif, bakteriyolojik ve ekolojik özelliklerinin olumsuz yönde değişmesi olarak tanımlanan su kirliliği, ülkemiz çevre sorunları içerisinde ilk sırasında yer almaktadır (Dorak, Aşık ve Özsoy, 2019).

Son yıllarda, özellikle nehirlere bırakılan atık sular tatlı suların zehirli kimyasal maddelerle kirlenmesine sebep olmaktadır. Bu zehirli kimyasal maddelerin başında metaller gelmekte olup, küresel ekosistemi ve insan sağlığını büyük ölçüde tehdit etmektedir (Kumar, vd., 2020; Siddiqui ve Pandey, 2019).

“B” kimyasal sembolü ile gösterilen B, periyodik tablonun 13. grubunda metal ile ametal arasındaki sınırda yer alan bir elementtir. Atom ağırlıkları 10,81 g/mol, özgül ağırlığı 2,30 - 2,46 gr/cm³ olan B'nin 10B ve 11B olmak üzere iki adet doğal izotopu bulunur (Ediz ve Özdağ, 2001). Diğer elementlerle bileşik halinde bulunan B doğada, borik asit, borat ve boroksit gibi farklı bileşikler halinde bulunmaktadır (Brdar-Jokanović, 2020; Parks ve Edwards, 2005). Ayrıca, oksijen ile kolay bağ kurabilme özelliğinden dolayı da B'nin borat olarak tanımlanan çok sayıda oksijen bileşiği

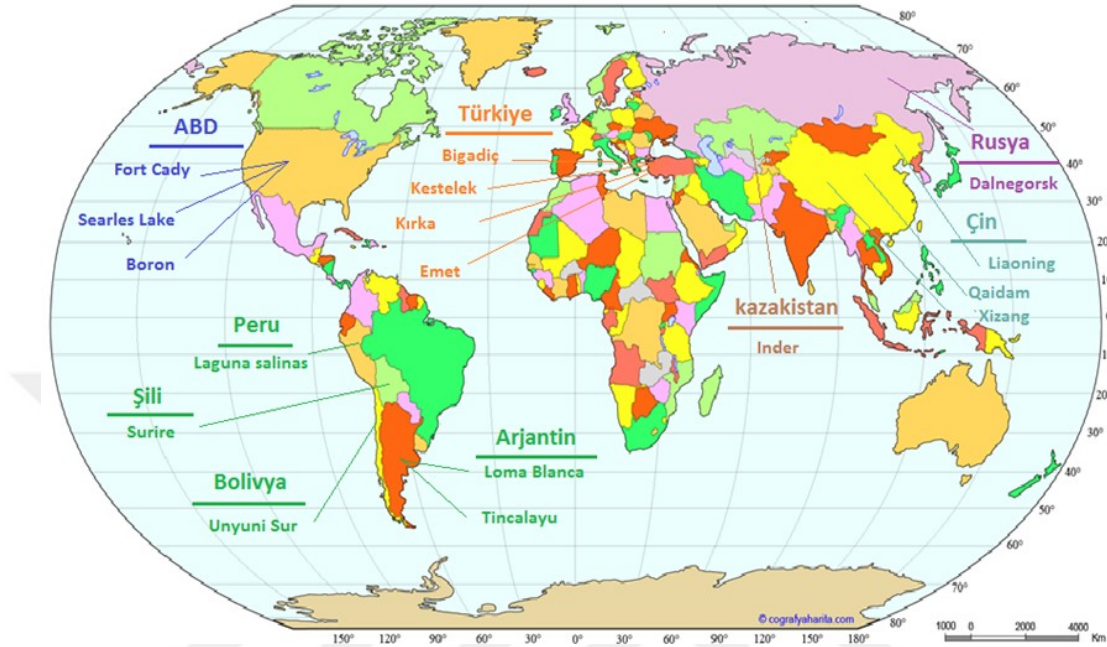
(örneğin; ortoborik asit, metaborik asit, sübborik asit ve boronik asit) bulunmaktadır (Bor-oksijen bileşikleri, 2022).

Tarih boyunca B çeşitli formlarda çamaşır deterjanlarında, temizlik maddelerinde, gübreler, farmasötik ve floresan sensörlerde bir bileşen olarak kullanılmıştır. Ayrıca gıda koruyucu, yalıtım malzemesi ve alev geciktirici olarak da borik asit ve boraks (tetrasodyum dekahidrat, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kullanılmaktadır (Hadrup, vd., 2021). 4000 yıl önce ilk defa Babiller Uzak Doğudan ithal ettikleri boraksı altın işletmeciliğinde kullanırken, Eski Mısırlılar da mumyalama, tıp ve metalurji uygulamalarında B kullanılmışlardır. Ticari açıdan öneme sahip tıkal B minerali ise ilk olarak sekizinci yüzyılda Mekke ve Medine çevresinde kullanılmıştır. Boraksın Avrupalı kuyumcular tarafından kullanımı ise 12. yüzyıla dayanmaktadır (Woods, 1994). Boraksın en eski kaynağı Tibet gölleri olup (Woods, 1994), 13. yüzyılda Venedikli kâşif ve tüccar Marco Polo tarafından Avrupa'ya getirmiş ve burada lehimleme ve sırlama malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Ediz ve Özdağ, 2001). Elementel B, 1808 yılında İngiliz kimyacı Sir Humphry ve Fransız kimyacı Gay Lussac tarafından keşfedilmiştir (Bilgiç ve Dayık 2013). Ülkemizde ise pandemit adı verilen bir B minerali ilk olarak Balıkesir'in Susurluk ilçesi yakınlarındaki Sultan Çayırı'nda bulunmuştur. Bunu dünyanın en kaliteli kolemanitlerinin çıkarıldığı Emet, Bigadiç, Kestelek yatakları ile Kırka tıkal yataklarının bulunması takip etmiştir (Türkiye'nin Yükselen Değeri: Bor, 2022; Yiğitbaşıoğlu, 2004).

Dünya üzerindeki ticari öneme sahip B rezervleri Mojave Çölü (Kaliforniya/ABD), And Kemerleri (Güney Amerika), Güney-Orta Asya Orojenik Kemerleri (ülkemizde bu bölgede yer almaktadır) ve Doğu Rusya bölgelerinde bulunmaktadır (Şekil 1.1). ABD, Arjantin, Şili, Peru ve Türkiye'deki ticari borat yataklarının çoğu, karasal yataklar ve asit volkanları ile ilişkilidir. Dünyanın en büyük ve en iyi çalışılan borat yatakları Batı Anadolu'daki (Türkiye) borat yataklarıdır. Borat yatakları Batı Anadolu'da 300 km doğu-batı ve 150 km kuzey-güney yönünde uzanan bir alanda yer almaktadır. Anadolu'da B kaynağı alkali volkanik kayalardır (Helvacı ve Palmer, 2017). Dünya B rezervleri (Tablo 1.1) içinde Türkiye'nin payı yaklaşık %73'dür. Ülkemiz B rezervleri açısından değerlendirildiğinde, ilk sırada yer alan tıkal yatağı Kırka/Eskişehir, kolemanit yatakları ise Emet/Kütahya, Bigadiç/Balıkesir ve Kestelek/Bursa'da bulunmaktadır (Dal ve Dal, 2021). Türkiye'de B ve B ürünlerinin üretilmesi, işlenmesi ve pazarlanması faaliyetlerini gerçekleştirme görevi 2840 sayılı

Kanun gereği Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmektedir (Eti Maden ile İlgili Sorular, 2022).

Şekil 1.1: Dünya Üzerindeki Ticari Öneme Sahip B Rezervlerinin Dağılım Haritası



Kaynak: Dünya dilsiz haritası, 2023; Helvacı ve Palmer, 2017: 250

Tablo 1.1: Ülkelere Göre Dünya B Rezervleri

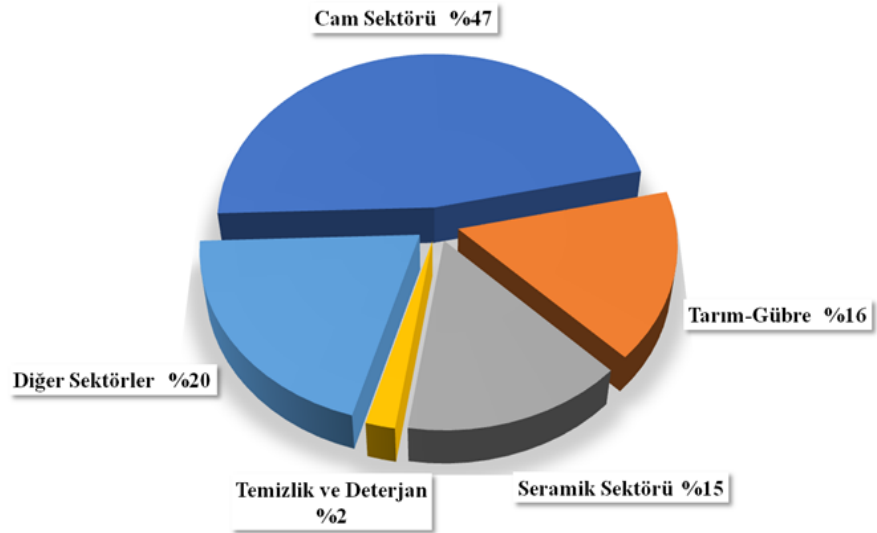
Ülkeler	Toplam Rezerv (Bin Ton B ₂ O ₃)	Dağılım (%)
Türkiye	956.000	73,3
Rusya	100.000	7,8
A.B.D.	80.000	6,2
Şili	41.000	3,2
Peru	22.000	1,7
Bolivya	19.000	1,5
Kazakistan	15.000	1,2
Toplam	1.282.782	

Kaynak: Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2022

B minerallerinin kullanım alanları cam sanayi, yakıtlar ve polimerik malzemeler, elektronik ve iletişim, nükleer uygulamalar, metalurji ve inşaat, nanoteknoloji, askeri araçlar, tarım, otomotiv ve enerji, uzay ve hava araçları, kimya ve

deterjan sektörleridir (Millas, 2020; Sanayinin Stratejik Ham Maddesi: Bor, 2023). Bu sektörler içinde en fazla B minerallerinin kullanıldığı sektör cam sektörü olup (%47) bunu %16 ile tarım-gübre sektörü takip etmektedir (Dal ve Dal, 2021; Şekil 1.2).

Şekil 1.2: Dünyada Sektörel Bazda B Ürünlerinin Tüketimi



Kaynak: Dal ve Dal, 2021: 60

Hidrosfer ve litosferde yaygın olarak bulunan B'nin topraktaki konsantrasyonu toprağın cinsine, organik madde miktarına ve yağış miktarına bağlı olmakla birlikte 10-300 mg/kg (Ozturk, vd., 2010), kayalarda 5-10 mg/kg, denizlerde ~4,5 mg/L (Degryse, 2017), tatlı yüzey sularında ise <0,1–0,5 mg/L'dur (Emiroğlu, vd., 2010).

Yüzey sularında B, sanayi kaynaklı atıklar, tarımsal yüzey akışlar ve bitkinin çürümesi sonucu ortaya çıkmaktadır (Başkan ve Atalay, 2014). Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre ülkemiz yüzeysel sularının B konsantrasyonları; Kızılırmak Nehri'nde 0,243 mg/L (Aras ve Fındık, 2018), Orhaneli Çayı'nda 0,13-0,18 mg/L, Emet Çayı'nda 4,68-28,24 mg/L, Mustafakemalpaşa Çayı'nda 0,90-3,22 mg/L, (Turhan ve Kuşçu 2020), Kurubaş Nehri'nde 1,2 mg/L, (Atıcı, 2021) olarak ölçülmüştür. Ayrıca Emet ve Orhaneli çayların sedimentinde de B seviyeleri 18,05 ile 36,7 mg/kg arasında tespit edilmiştir (Arslan, 2013). Kuru, vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada, ülkemiz 75 ilinin içme suyu örneklerinin B konsantrasyonlarını incelemiş ve en yüksek B seviyesini Kayseri ilinin musluk suyunda bulunurken bunu Aydın, Hakkâri, Iğdır, Kırıkkale, Ağrı, Elazığ ve Nevşehir illeri izlemiştir. Ayrıca atık suların B

konsantrasyonları 5-100 mg/L arasında değişmektedir (Özkul, Çiftçi ve Savaş, 2017; Turhan ve Kuşçu, 2020).

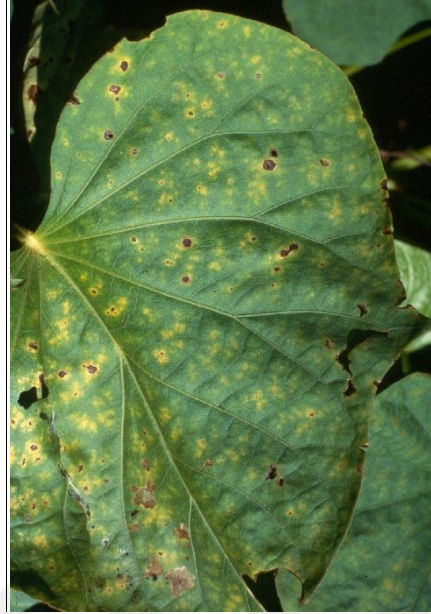
1.2. BOR ve BİTKİLER

B, bitkilerde birçok fizyolojik ve biyokimyasal rolü olan bir mikro besin elementidir. B'nin şeker taşınması, nükleik asitlerin, karbonhidratların, fenol ve proteinlerin metabolizması, solunum ve hücre duvarı oluşumu gibi birçok metabolik faaliyette rolü vardır. B noksanlığı ve toksisitesinin bitkilerde çok dar bir konsantrasyon aralığı vardır. 0,5 mg/kg'den düşük B konsantrasyonları eksiklikle ilişkilendirilirken, 5,0 mg/kg'den yüksek seviyeler toksisiteye neden olur (Marschner, 2011; Öztürk, vd., 2018).

Bitkilerde B noksanlığı ile toksisite arasındaki aralık diğer mineral besin maddelerine göre çok dardır. B stresi diğer birçok faktörle (aşırı sıcaklıklar, artan ışık, yüksek karbondioksit konsantrasyonu, kuraklık, tuzluluk veya ağır metal kontaminasyonu vb.) aynı anda çalışır ve bahsedilen faktörlerin etkileri bitkilerin B toksisitesine veya eksikliğine duyarlılığını artırabilir (García-Sánchez, vd., 2020).

Yüksek B konsantrasyonuna maruz kalan bitkilerde en sık görülen semptom, özellikle daha olgun yapraklar olmak üzere, yaprakların kenar ve uçlarında kloroz ve nekroz olarak yanıklar görülür (Öztürk, vd., 2018; Simón-Grao, vd., 2018; Şekil 1.3). B toksisitenin nedenleri genelde ikiye ayrılır. Sulama sularındaki yüksek B içeriği ve topraktaki B eksikliğini dengelemek için fazla gübre kullanmasıdır (Kaçar, 2012). B toksisitesi bitkilerde metabolizmanın değişmesi, klorofil içeriğinin azalması ve fotosentetik hızın düşmesi gibi birçok zarara neden olur (Vera, vd., 2021). Toksisite, hücre bölünmesini değiştirir ve hücre büyümesini azaltır, böylece bitkinin büyümesinin ve üretkenliğinin azalmasına neden olur (Öztürk, vd., 2018).

Şekil 1.3: Bor Toksisitesi



Kaynak: Boron toxicity, 2023

B eksikliği ise bitkilerin büyümesinde hızlı inhibisyona neden olan temel bir elementtir. Ayrıca B eksikliği, yaprak uçlarının, nekrotik yaprak dokularının kurumasına ve gövdede belirgin yanıl sürgün oluşumuna da yol açar (Junior, vd., 2021). B noksanlığı bitkilerde hücre duvarı ve zarının yapısal stabilitesinin kaybolmasına, nitrojenazın inaktivasyonuna ve fenolik havuzun artmasına neden olur (Vera, vd., 2021). B noksanlığı ilk başta gövde ve kök uçlarında, genç yapraklarda ve çiçek tomurcuklarında görülmektedir. Genel olarak bitkilerde B noksanlığı meyvelerin renklerini yitirmesi, köklerin ve gövdelerin büyüme uçlarında azalması gibi belirtiler yanında yapraklarında solma ve kalınlaşma şeklinde ortaya çıkar. B noksanlığı yonca gibi bitkilerde hem çiçeklenme hem de tohum oluşumunda büyük bir azalmaya neden olurken, bazı meyveli bitkilerde örneğin üzüm bitkisinde meyvelerde kuruma ve meyve bağlama da düşüş görülmüştür (Kaçar, 2012).

1.3. ATIK SULARIN TEMİZLENME YÖNTEMLERİ ve FİTOREMEDİASYON (YEŞİL İSLAH)

Atık sular, kaynağına göre genel olarak iki ana kategoriye ayrılır: a) Evsel atık su; esas olarak yiyecek hazırlama, yıkama, temizlik vb. faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. b) Endüstriyel/ticari atık su; madencilik, gıda, ilaç, içecek vb. işleme ve üretimi gibi çeşitli endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Bu atıkların

temizlenmesinde farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri kullanılmaktadır (Abdel-Raouf, vd., 2019).

Fiziksel arıtma yöntemi, kirleticinin biyokimyasal özelliklerini değiştirmeden kirleticilerin uzaklaştırılmasını ifade eder. Fiziksel işlemler genellikle biyolojik veya kimyasal işlemlerden önce gelir. Yaygın olarak benimsenen fiziksel arıtma stratejilerinden bazıları; çökeltme, sıyırma, havalandırma, ısıl işlem, adsorpsiyon, membran filtrasyonudur (Ahmed, vd., 2021).

Geleneksel kimyasal arıtma yöntemleri ise kimyasal çökeltme, flokülasyon, koagülasyon, iyon değişimi ve elektrokimyasal gibi birçok işlemleri içerir (Gunatilake, 2015).

Biyolojik arıtma yöntemi, kirleticileri azaltmak için düşük maliyetli, ekolojik olarak kabul edilebilir bir yöntemdir. (Singh, vd., 2022) Bu yöntemde, biyosorpsiyon, biyoadsorpsiyon ve fitoremediasyon (Yeşil Islah) olmak üzere farklı teknik kullanılmaktadır. Biyosorpsiyon, bakteri, fungus ve alg gibi biyomateriyaller kullanılarak düşük konsantrasyonlu yüksek hacimli metal içeren atık suların arıtılması için düşük maliyetli bir biyoteknolojik yöntem olarak bilinir ve biyokütle kullanarak metal iyonlarının sulu ortamdan uzaklaştırılmasını sağlar (Hamutoğlu, vd., 2012). Biyoadsorpsiyon ise, sorbat (ağır metaller) konsantrasyonunun biyo-yüzeyde adsorbe edildiği fiziko-kimyasal bir süreçtir. Genel olarak, bu biyolojik yüzey canlı bir biyokütle değildir. Buna göre, metabolik olarak pasif bir mekanizma, metal iyonlarını sulu çözeltilerden fonksiyonel gruplara bağlayan hızlı ve geri dönüşümlü bir mekanizmadır. (González, vd., 2017).

Fitoremediasyon, kirleticilerin ortamdaki konsantrasyonlarını veya toksik etkilerini azaltmak için bitki ve toprakla ilişkili mikroorganizmaların canlı olarak kullanıldığı bir tekniktir. Yukarıda bahsedilen arıtma yöntemlerinin aksine, fitoremediasyon yeni bir teknolojidir ve geniş çapta kabul gören uygun maliyetli ve çevre dostu olup (Ali, Khan ve Sajad, 2013; Kumar, vd., 2021; Liu ve Tran, 2021; Saleh, Mustaqeem ve Khaled, 2021), fitoremediasyon: fitoekstraksiyon, rizofiltrasyon, fitostabilizasyon, fitovolatilizasyon, fitodegradasyon ve rizodegradasyon olmak üzere 6 tekniğe ayrılmaktadır. (Aybar, Bilgin ve Sağlam, 2015; Hamutoğlu, vd., 2012).

1.3.1. Fitoekstraksiyon

Bu yöntemde, kirleticiler bitkinin kökleri tarafından emilir ve daha sonra toprak üzerindeki organlarda birikmeleri, ardından bitkilerin hasat edilmesi ve imha edilmesidir. Toprak çözeltisinde düşük çözünürlüğe sahip minerallerin çözünürlüğünü artırmak için şelatlama maddeleri eklenebilir. Hasat edilen bitki artıkları kurutulup ve daha sonra yakılarak kül haline getirilebilmekte, izole edilerek geri dönüşüm ile biyomineral madeni olarak kullanılabilir (Hamutoğlu vd., 2012).

1.3.2. Rizofiltrasyon

Bitki köklerinin ve mikroorganizmaların, kirleticileri atık sudan uzaklaştırmak için etkileşime girdiği süreçlerdir. Kök sistemlerinde atık sudan ağır metal iyonları gibi kirleticilerin filtrasyonunu, absorpsiyonunu, konsantrasyonunu ve alımını içerir (Odinga, vd., 2019).

1.3.3. Fitostabilizasyon

Kirleticileri topraktan ve sudan emerek daha sonra köklerde biriktirerek tutmayı amaçlar. Bu yöntem, erozyon, rüzgâr, su ve toprak yayılımı nedeniyle kirleticilerin saha dışına taşınmasını önler. Aynı zamanda toprak verimliliğini artırır, böylece ekosistem restorasyonunu sağlar (Bolan, vd., 2011).

1.3.4. Fitovolatilizasyon

Başka bir fitoremediasyon stratejisi olarak, kirleticilerin bitki tarafından emilmesine, daha sonra uçucu bileşiklere dönüştürülmesine ve bu bileşikler olduğu gibi veya değişen bir biçimde metabolik süreçler ve terleme sonucunda atmosfere salmasına sağlamaktadır (Wang, vd., 2021).

1.3.5. Fitodegradasyon

Kök bölgesinde bulunan bakteri aktivitesi yardımıyla topraktaki organik kirleticilerin ayrışmasıdır. Fitodegradasyon, bitki destekli ayrışma ve bitki destekli biyoremediasyon olarak da bilinir içerir (Kharwade, vd., 2020).

1.3.6. Rizodegradasyon

Bu yöntem, kök eksüdatları olarak adlandırılan rizosfer bölgesine çok çeşitli bileşiklerin salınmasına dayanır. Bu eksüda salgıları, amino asitleri, organik asitleri, karbonhidratları ve diğer ikincil metabolitleri içerir. Kök eksudası, kök bölgesindeki

mikroorganizmaların büyümesini etkili bir şekilde teşvik edebilir ve böylece organik kirleticilerin hızlıca temizlenmesini teşvik etmektedir (Jia, vd., 2016).

Hiperakümülatör bitki olarak tanımlanan bazı bitki türleri kirletici unsurları biyolojik olarak biriktirme konusunda yüksek yeteneğe sahiptirler. Brassicaceae, Euphorbiaceae, Asteraceae, Fabaceae, Lamiaceae ve Scrophulariaceae familyaları en fazla hiperakümülatör bitki türü içeren familyalar olup, 500'den fazla bitki türü ağır metallerin atık suların temizlenmesinde hiperakümülatör bitki olarak tanımlanmıştır (Gavrilescu, 2022; Zhang vd., 2022; Tablo 1.2).

Tablo 1.2: Bazı Hiperakümülatör Bitki Türleri

Biki	Metal	Akümülayon (µg/g)
<i>Pteris vittata</i>	As	> 1.000
<i>Arabidopsis halleri</i>	Cd	> 100
<i>Aeolanthus biformifolius</i>	Cu	> 300
<i>Haumaniastrum robertii</i>	Co	> 300
<i>Virotia neurophylla</i>	Mn	> 10000
<i>Berkheya coddii</i>	Ni	> 1000
<i>Noccaea rotundifoia</i> subsp. <i>cepaefolia</i>	Pb	> 1000
<i>Noccaea caerulescens</i>	Zn	> 3000

Kaynak: Reeves, vd., 2017

1.4. BOR FİTOREMEDİASYONU

Dünyanın B yatağı rezervlerine bakıldığında Türkiye şu anda en büyük borat üreticisidir. B üretimi, 1980'den beri ciddi oranda artarak yılda bir milyon tonun üzerine çıkmıştır, çoğu Kırka ve Emet'te bulunur. B üretimi Türkiye'nin B dünya pazarlarına muhtemel hâkim olmasını öngörmektedir (Helvacı ve Palmer, 2017).

De Abreu vd. (2012) yaptıkları çalışmada, Brezilya Piracicaba bölgesinde bulunan otomobil hurda atıkları ile kirlenmiş yaklaşık 3 hektarlık bir tarım arazisindeki topraktan alınan örneklerin B içeriğini 62 mg/kg olarak tespit etmiş, *Ricinus communis* (hint yağı) bitkisini B'nin fitoremediasyonunda kullanmıştır ve hint yağı filizlerinde 536 ve 626 mg/kg B tespit edilmiştir.

Türker, Böcük ve Yakar (2013) çalışmalarında, Kırka Boraks Üretim Tesisi atıksu havuzundan aldıkları sulardan B (2019 mg/L), Ca, Mg, Na, K, P'un iyileştirilmesi için *Typha latifolia* ve *Phragmites australis* bitkilerini kullanmışlar ve *T. latifolia* ve *P. australis* bitkilerinin sırasıyla 250 mg/kg ve 38 mg/kg B'yi bünyelerinde biriktirdiğini tespit etmişlerdir.

Ramila vd. (2015) Kuzey Şili'de yaptıkları çalışmada, *Puccinellia frigida* bitkisini B'yi fitoremediasyonda kullanmış ve translokasyon faktörünü >1 üzerinde hesaplamışlardır. Ayrıca, B'ye en yüksek toleranslı tür olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bir başka çalışmada, *Lemna minor* ve *Lemna gibba* bitkileri 4, 8, 16, 32, 64 ve 128 mg/L B konsantrasyonlarında 7 gün boyunca yetiştirmiş ve bu iki türün düşük konsantrasyonlarda B ile kirlenmiş atık suların iyileştirilmesi için önemli bitkiler olduğunu ortaya koymuştur (Gür, Türker ve Böcük, 2016). Subpiramanyam (2021) yapmış olduğu çalışmada, hidroponik kültürde serada 0,3 - 6 mg/L H₃BO₃ içeren besin solüsyonunda yetiştirilen *Portulaca oleracea* fidelerinin B karşı toleranslı olduğunu ve organlarında B biriktirebildiğini bulmuştur. Tablo 1.3'de B'yi akümüle edebilen bitkiler verilmiştir.

Bu çalışmamızda, sulak alanlarda yayılış gösteren *L. salicaria* bitkisinin a) hidroponik kültür ortamında ve artan B konsantrasyonlarında yetiştirilerek bitkinin B'ye olan tolerans sınırının belirlenmesi, b) B'nin bitkinin büyüme parametreleri ve stres göstergesi olan klorofil miktarı üzerine olan etkisinin saptanması ve c) bitkinin B akümülyasyon kapasitesinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Tablo 1.3: B Akümülayonunda Kullanılan Bazı Bitki Türleri

Bitki Türü	B Konsantrasyonu/ Ortam	Zaman Aralığı	Kök B Akümülayonu	Gövde B Akümülayonu
<i>Lemna gibba</i>	3, 4, 5, 6, ve 8 mg/L	4 gün	-	-
<i>Myriophyllum elatinoides</i>	10, 20, 30, 40, ve 50 mg/L	33 gün	350,7 mg/kg	1296,5 mg/kg
<i>Puccinellia tenuiflora</i>	300 mg/L	3 hafta	250mg/L B konsantrasyonunda biyokonsantrasyon faktörü 42,64	250mg/L B konsantrasyonunda biyokonsantrasyon faktörü 70,02
<i>Calopogonium mucunoides</i>	30, 60, 120, 240 ve 480 mg dm ⁻³	120 gün	61.6 mg/kg	56.3 mg/kg
<i>Stizolobium aterrimum</i>	30, 60, 120 ve 240 mg dm ⁻³	45 gün	0.37 mg/kg	0.73 mg/kg
<i>Tripolium pannonicum</i>	0.25-40 mg/L	2 hafta	0.23 mg/g	0.45 mg/g
<i>Suaeda glauca</i>	0.25-250 mg/L	2 hafta	250mg/L B konsantrasyonunda biyokonsantrasyon faktörü 2,81	250mg/L B konsantrasyonunda biyokonsantrasyon faktörü 9,91
<i>Iris wilsonii</i>	0.25-700 mg/L	2 hafta	700 mg/L B konsantrasyonunda biyokonsantrasyon faktörü 9,56	700 mg/L B konsantrasyonunda biyokonsantrasyon faktörü 21,73
<i>Puccinellia tenuiflora</i>	0.25-300 mg/L	2 hafta	300 mg/L B konsantrasyonunda biyokonsantrasyon faktörü 8,76	300 mg/L B konsantrasyonunda biyokonsantrasyon faktörü 26,77
<i>Phragmites australis</i>	1, 5, 10, 50, 100, 250, 500, 750, ve 1000 mg/L	15 gün	-	-
<i>Typha latifolia</i>	1, 5, 10, 50, 100, 250, 500, 750, ve 1000 mg/L	15 gün	-	-
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	1, 5, 10, 50, 100, 250, 500, 750, ve 1000 mg/L	15 gün	-	-
<i>Populus russkii</i>	10, 20, 30, 40, ve 50 mg/kg	2 ay	50 mg/kg B konsantrasyonunda köklerin büyümesi inhibe edilmiştir.	50 mg/L B konsantrasyonunda 22.4 mg/kg
<i>Zea mays</i>	15 ve 30 mg/kg	1 hafta	Yüksek B konsantrasyonu, kök gelişimini %21,77'ye kadar azaltmıştır.	Artan B konsantrasyonu, gövde büyümesini azaltmıştır.

Kaynak: Kumar, vd., 2022



İKİNCİ BÖLÜM
MATERYAL VE METOD

2.1. *Lythrum salicaria* L. (KIRMIZI HEVHULMA)

Avrupa, Asya ve Kuzey Amerika da yayılış gösteren *L. salicaria* yıllardır geleneksel tıbbi bitki olarak kullanılmıştır (Şekil 2.1). Lythraceae familyasına ait olan ve halk arasında kırmızı hevhulma olarak adlandırılan *L. salicaria* kan anlamına gelen Yunanca lythron'dan türetilmiştir (Mitich, 1999).

Şekil 2.1: *L. salicaria* Genel Görünümü



Nehir, göl ve sulak alanların kenarlarında yetişen *L. salicaria* 30-200 cm boyunda çok yıllık bir bitkidir. Gövde 20-180 cm kanatlı, seyrek dallıdır, yapraklar 10-70 mm, oval-mızraksı, çiçekler 3-8, aksiller kıvrımlar şeklinde ve çok sayıda tohum üretebilmektedir (3 milyondan fazla tohum/bitki). Türkiye'nin, Çanakkale, Tekirdağ, İstanbul, Kastamonu, Rize ve Giresun şehirlerinde yaygın olarak bulunmaktadır (Davis, 1972; Thompson, Stucky ve Thompson, 1987; Uveges, Corbett ve Mal, 2002).

Kronik ishal, dizanteri, kanama, kan tükürme, yaralar ve ülser hastalıkları tedavi etmek için *L. salicaria* köklerinden elde edilen tanin bakımından zengin olan yaprakların toz haline getirildikten sonra kaynatılarak kullanıldığını gözlemlenmiştir. 2 metreden uzun olgun bir bitki otuz kadar çiçekli gövdeye sahip olabilmektedir (Grieve, 1974; Thompson, Stucky ve Thompson, 1987).

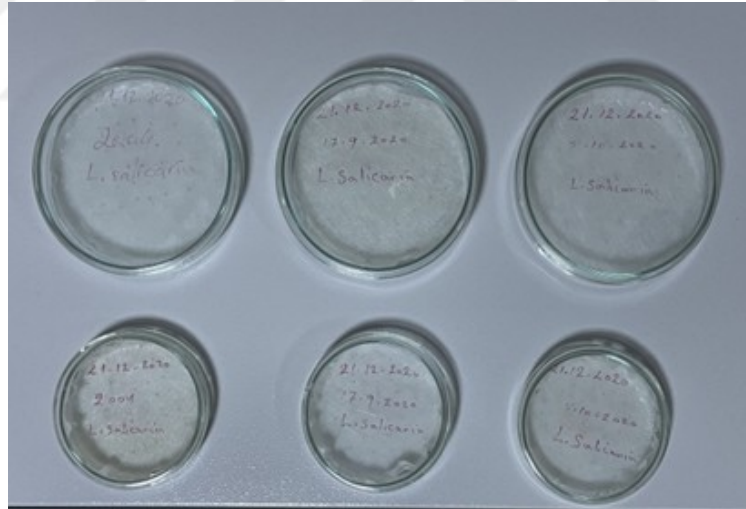
2.2. *L. salicaria* TOHUMLARININ TOPLANMASI

Kütahya Dumlupınar Üniversitesinde bulunan yapay göllerin kenarlarında yetişen *L. salicaria* bitki tohumları, 2020 yılı Eylül-Ekim aylarında olmak üzere iki farklı zamanda toplanmıştır. Tohumları elde etmek için *L. salicaria* bitki kapsülleri oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan kapsüllerin içindeki tohumlar ayıklanarak ışık görmeyen ve nem almayan laboratuvar ortamında cam kavanozlarda daha sonra kullanmak üzere muhafaza edilmiştir.

2.3. *L. salicaria* TOHUMLARININ ÇİMLENDİRİLMESİ ve YETİŞTİRİLMESİ

Öncelikle toplanan *L. salicaria* tohumlarının canlı ve sağlıklı olup olmadığını belirlemek için çimlendirme testi yapılmıştır. Bunu için tohumlar içinde filtre kâğıdı bulunan petri kaplarına her bir petriye 30 adet tohum olmak üzere konulmuş üzerine saf su ilave edilmiştir. Hazırlanan petri kapları sıcaklığı 25 °C ve nemi %70 ayarlanmış NÜVE TK120 marka bitki büyütme dolabında çimlenmeye bırakılmıştır (Şekil 2.2).

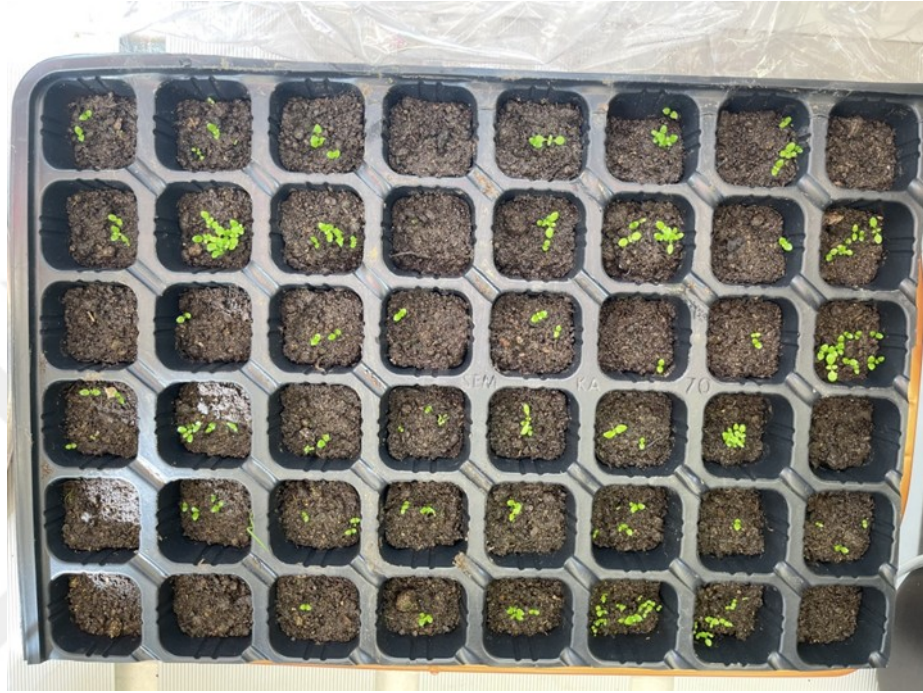
Şekil 2.2: *L. salicaria* Tohumları Çimlendirme Testi



Tohumların çimlenme yüzdesi belirlendikten sonra, çalışmamız boyunca fidelerin yetiştirileceği ve sulamalarının yapılacağı Hoagland solüsyonu hazırlanmıştır (Hoagland ve Arnon, 1950; Kocaçalışkan, 2008). Fitoremediasyon çalışmaları için *L. salicaria* tohumları içinde torf toprağı bulunan viyollerde çimlendirilmiştir. Viyollerdeki her bir göz içine 10-15 adet tohum konularak tohumların üzeri ince bir tabaka torf toprağı ile kapatılmıştır. Daha sonra toprak %10 Hoagland çözeltisi ile sulanmıştır. *L. salicaria* sulak alan bitkisi olduğundan, viyoller içinde yaklaşık 5 cm derinliğinde %10 Hoagland solüsyonu bulunan kapların içerisine konulmuştur (Şekil

2.3). Nem kaybını önlemek için viyoller, streç film ile kapatılıp 25 °C ve 3300 lux ışık şiddetini sağlayan su kültürü odasında çimlenmeye bırakılmıştır. Fideler çimlendikten sonra (yaklaşık 7 gün sonra) viyol üzerindeki streç film çıkartılıp, bitkinin yaprak sayısı 10-12 ulaşana kadar su kültürü odasında aynı şartlarda yetiştirilmiştir.

Şekil 2.3: Viollerdeki *L. salicaria* Fideleri



2.4. FİTOREMEDİASYON DENEYLERİ

10-12 yaprak sayısına ulaşan *L. salicaria* fideleri topraktan çıkarılarak içinde %10 Hoagland solüsyonu bulunan 2,5 L hidroponik kültür saksılarına adaptasyon için alınmıştır. Fideler adaptasyonda 7 gün boyunca tutulmuştur. Fitoremediasyon deneylerin ilk aşamasında, adaptasyondan alınan *L. salicaria* fidelerinin kök uzunlukları (cm), gövde uzunlukları (cm), yaprak sayıları ve yaş ağırlıkları (g) ölçülüp “ilk ölçümler” olarak not alınmıştır. Ölçümleri alınan fideler daha sonra içinde 0 (kontrol); 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2; 3; 4; 5; 8; 9; 10; 20; 30; 40; 50; 75 ve 100 mg/L B bulunan %10'luk Hoagland solüsyonuna aktarılmıştır. Deneyler boyunca fide köklerinin oksijen ihtiyaçlarını karşılamak için saksılar hava motoruna bağlanmışlardır. Saksılardaki solüsyonlar hergün kontrol edilmiş ve su seviyesinin düşmesine izin verilmeden solüsyon ilavesi yapılmıştır (Şekil 2.4).

Şekil 2.4: Hidroponik Ortama Aktarılan *L. salicaria* Fideleri



15 gün sonunda 5, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 75 ve 100 mg/L B çözeltilerde yetiştirilen bitkilerde nekroz ve kloroz belirtileri yapraklar üzerinde teşhis edilmiştir. Bu nedenle 5, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 50, 75 ve 100 mg/L B konsantrasyonları fitoremediasyon çalışmalarında kullanılmamış ve 0-4 mg/L B arasındaki konsantrasyonlarda deneylere devam edilmiştir. 15 günün sonunda farklı B konsantrasyonlarda yetişen tüm *L. salicaria* fideleri çözeltilerden çıkarılmış ve kökleri önce %1'lik Na EDTA ve ardından saf su ile yıkanarak kurutma kâğıdı ile kurutulmuştur. Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen fidelerin kök uzunlukları (cm), gövde uzunlukları (cm), yaprak sayıları ve yaş ağırlıkları (g) ölçülmüş ve “son ölçüm” olarak not edilmiştir. Ölçüm işlemleri tamamlandıktan sonra fideler yağlı kâğıttan yapılmış paketler içerisine konularak 72 saat 105 °C’de etüv de kurutulmuştur. Kurutulmuş örnekler RETCH marka havanda öğütülüp B analizleri yapılana kadar laboratuvarında muhafaza edilmiştir.

2.5. *L. salicaria* FİDELERİNİN KLOROFİL ANALİZLERİ

10-12 yaprak sayısına ulaşan *L. salicaria* fideleri topraktan çıkarılarak içinde %10 Hoagland solüsyonu bulunan 2,5 L hidroponik kültür saksılarına adaptasyon için alınmıştır. Fideler adaptasyonda 7 gün boyunca tutulmuştur. Adaptasyon süresi bittikten sonra fideler 0 (kontrol); 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2; 3; 4 mg/L B solüsyonlarında 15 gün yetiştirilmiştir. 15 günün sonunda fideler hidroponik kültür saksılarından çıkarılıp, kök,

gövde ve yaprak olarak ayrılmış ve -80 °C ayarlanmış derin dondurucuda klorofil analizleri yapılana kadar muhafaza edilmiştir.

Yaprak klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve karotenoid miktarını hesaplamak için dondurucuda muhafaza edilen *L. salicaria* yapraklarından 0,5 gram tartılıp üzerine 15 ml % 80'lik aseton eklenmiş ve porselen havanda 15 dakika süreyle soğuk öğütme yapılmıştır. Elde edilen yaprak/aseton solüsyonunu SİGMA 3K30 santrifüj cihazı kullanarak 20.000 rpm, 20 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Bir cam deney tüpüne 4 ml %80'lik aseton konulduktan sonra, santrifüj edilmiş örneklerin süpernatant kısmından 1 ml alınarak vortekste karıştırılmış ve bu karışımdan 2 ml spektro küvetlerine konulup OPTİZEN marka spektrofotometrede üç farklı dalga boyunda (450 nm, 645 nm ve 663 nm) absorbans değerleri okunmuştur (Şekil 2.5). Yaprak klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve karotenoid miktarı aşağıda verilen formüllere göre hesaplanmıştır (Arnon, 1949).

$$\text{Klorofil a (mg/l)} = 12,7 \times A_{663} - 2,69 \times A_{645}$$

$$\text{Klorofil b (mg/l)} = 22,9 \times A_{645} - 4,68 \times A_{633}$$

$$\text{Toplam klorofil (mg/l)} = 2,02 \times A_{645} + 8,02 \times A_{633}$$

$$\text{Karotenoid (mg/l)} = (4,07 \times A_{450}) - (0,0435 \times \text{Klorofil a}) + (0,367 \times \text{Klorofil b})$$

2.6. *L. salicaria* FİDELERİNİN BOR ANALİZLERİ

L. salicaria fidelerinin akümüle ettiği B miktarını belirlemek için, daha önce toz haline getirilmiş bitki örneklerinin B analizi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi (ESOGÜ) Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (ARUM) yaptırılmıştır.

Şekil 2.5: *L. salicaria* Klorofil Deneyleri



2.7. ELDE EDİLEN VERİLERİN İSTATİKSEL ANALİZLERİ

Bu çalışmada deneyler üç tekrarlı olarak yapılmıştır. Elde edilen verilerin istatistiksel analizleri JMP 6 SAS İstatistiksel Analiz Programı kullanılarak değerlendirilmiştir (JMP 2005) *L. salicaria* bitkisinin büyüme parametreleri (kök uzunluğu, gövde uzunluğu ve taze ağırlık), nisbi büyüme (%) = $\left[\frac{\text{bitkinin B solüsyonundaki büyüme parametreleri}}{\text{kontrol grubu bitkinin büyüme parametreleri}} \right] \times 100$, formülü kullanılarak hesaplanmıştır (Bingöl vd., 2021). Artan B konsantrasyonu ile ortalama kök uzunluğu, gövde uzunluğu, taze ağırlık, klorofil a, klorofil b, toplam klorofil, karotenoid miktarı ve B birikimi arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için verilere korelasyon testi uygulanmıştır.

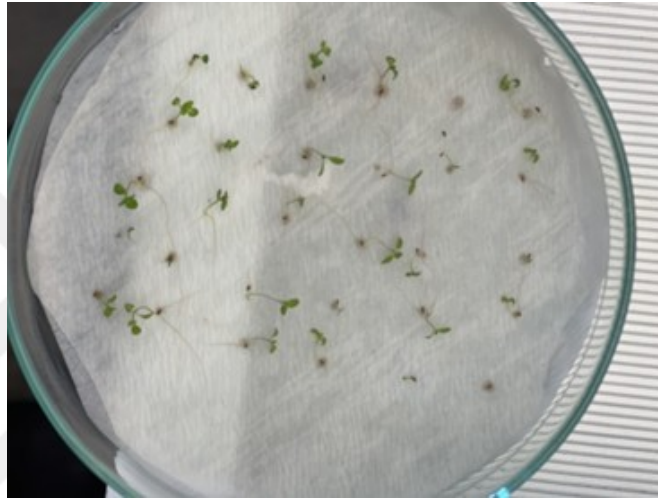


ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. BULGULAR

Eylül ve Ekim aylarında toplanan *L. salicaria* tohumlarının canlı ve sağlıklı olup olmadığını belirlemek için yapılan çimlendirme deneyleri sonucunda Eylül ayında toplanan *L. salicaria* tohumların çimlenme yüzdesi $86 \pm 1,1$ ve Ekim ayında toplanan tohumların çimlenme yüzdesi $50 \pm 1,9$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre fitoremediasyon deneylerine Eylül ayında toplanan tohumlarla devam edilmiştir (Şekil 3.1).

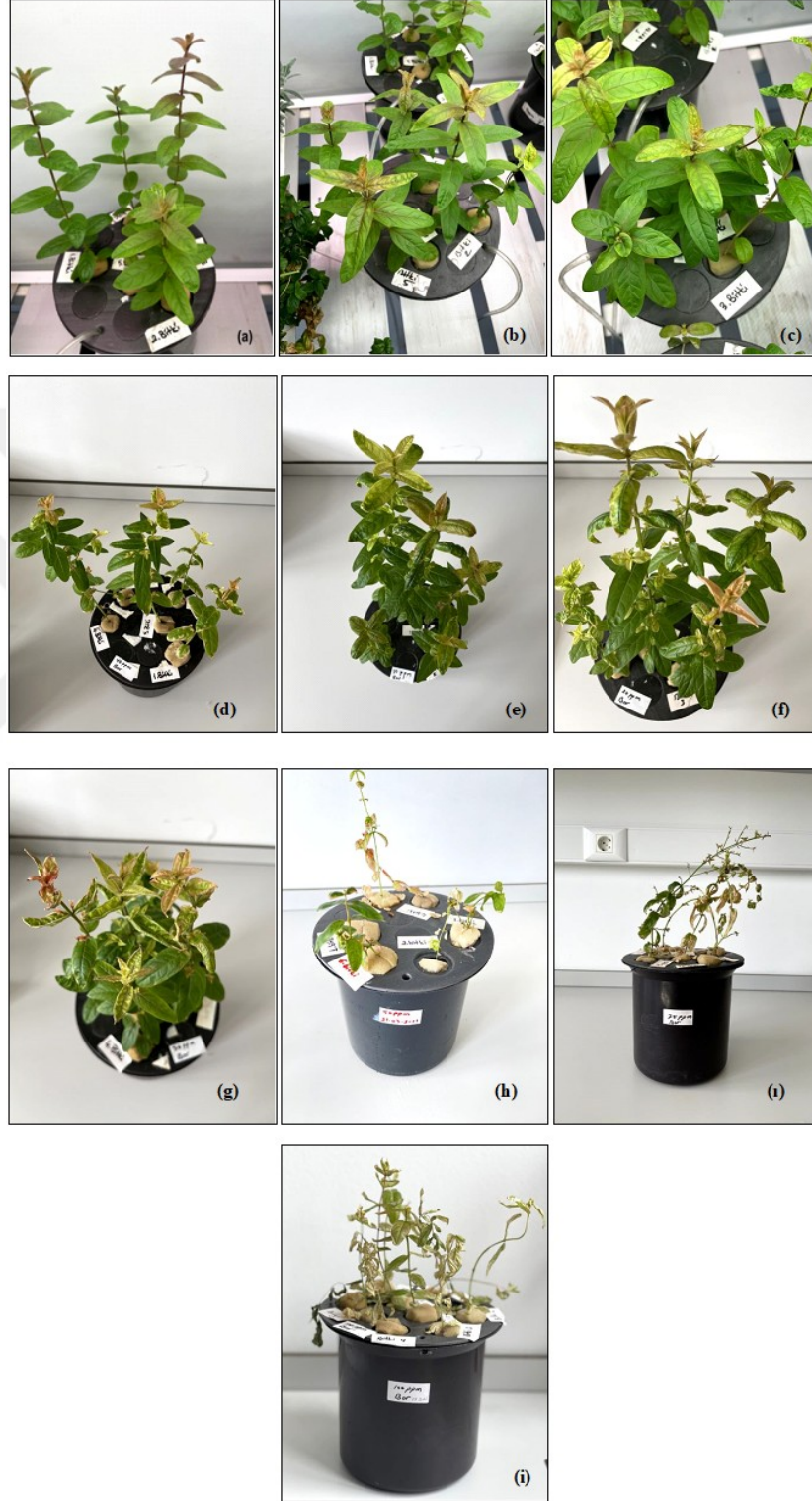
Şekil 3.1: *L. salicaria* Tohum Çimlenmesi



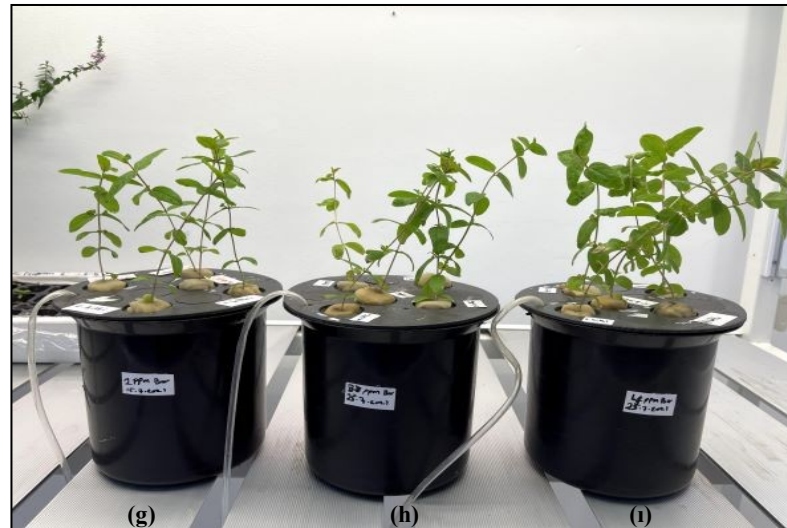
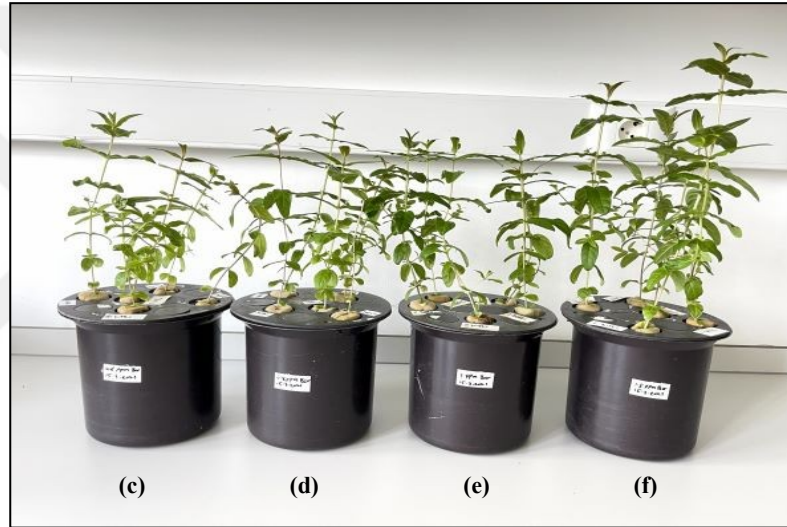
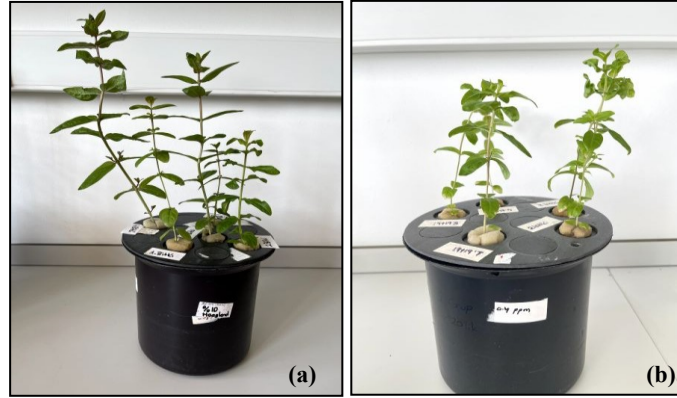
Çalışmamızda *L. salicaria* bitkisine 0 (kontrol); 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2; 3; 4; 5; 8; 9; 10; 20; 30; 40; 50; 75 ve 100 mg/L B olmak üzere 19 farklı B konsantrasyonu uygulanmıştır. Yapılan uygulamalar neticesinde 5-100 mg/L artan konsantrasyonlarında *L. salicaria* bitkisi yapraklarında kloroz ve nekroz belirtileri gözlenmiştir (Şekil 3.2). Bu konsantrasyonda yetiştirilen bitkiler sağlıklı olmadıklarından fitoremediasyon çalışmalarında kullanılmamış ve çalışmamıza 0-4 mg/L B konsantrasyonlarında devam edilmiştir (Şekil 3.3).

Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen *L. salicaria* fidelerine ait nisbi kök ve gövde uzunlukları ile nisbi taze ağırlıkları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Şekil 3.2: (a) 5 mg/L, (b) 8 mg/L, (c) 9 mg/L, (d) 10 mg/L, (e) 20 mg/L, (f) 30 mg/L, (g) 40 mg/L, (h) 50 mg/L, (i) 75 mg/L ve (i) 100 mg/L B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fidelerinde Görülen Kloroz ve Nekroz



Şekil 3.3: (a) 0 mg/L (kontrol), (b) 0,4 mg/L, (c) 0,6 mg/L, (d) 0,8 mg/L, (e) 1 mg/L, (f) 1,5 mg/L, (g) 2 mg/L, (h) 3 mg/L ve (i) 4 mg/L B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fideleri



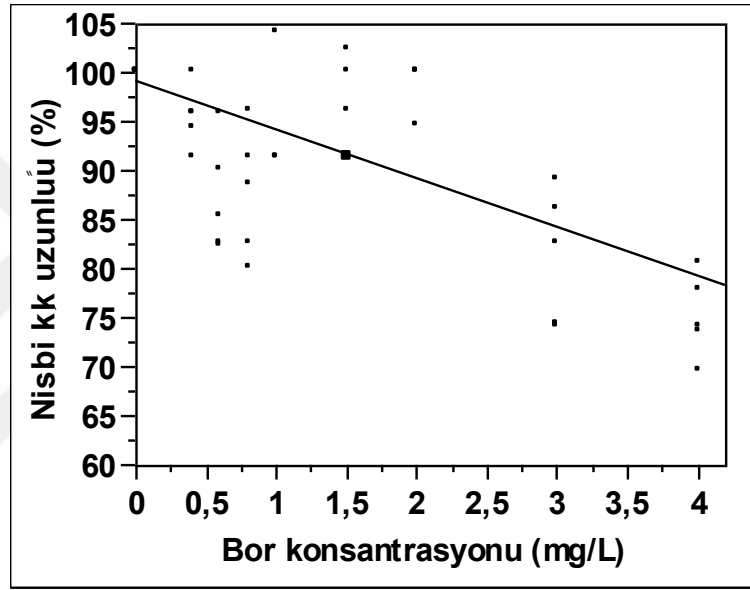
Tablo 3.1: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fidelerinin Büyüme Parametreleri

	B konsantrasyonları (mg/L)									Korelasyon Katsayısı
	Kontrol	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2	3	4	r
<u>Büyüme Parametreleri (%)</u>										
Nisbi kök uzunluğu	100,0 ± 0,00	95,4 ± 1,40	87,2 ± 2,52	87,7 ± 2,90	100,7 ± 4,00	100,3 ± 3,46	100,0 ± 1,76	81,2 ± 3,05	75,5 ± 1,87	-0,67*
Nisbi gövde uzunluğu	100,0 ± 0,00	95,0 ± 1,82	91,4 ± 2,36	95,1 ± 3,59	91,3 ± 1,33	91,6 ± 2,99	89,9 ± 1,78	81,5 ± 2,40	80,9 ± 2,70	-0,94*
Nisbi taze ağırlık	100,0 ± 0,00	97,5 ± 3,28	85,7 ± 4,43	89,4 ± 3,75	95,4 ± 2,76	94,0 ± 3,36	69,9 ± 3,46	64,4 ± 2,91	67,0 ± 1,79	-0,88*

*0,05 seviyesinde önemli

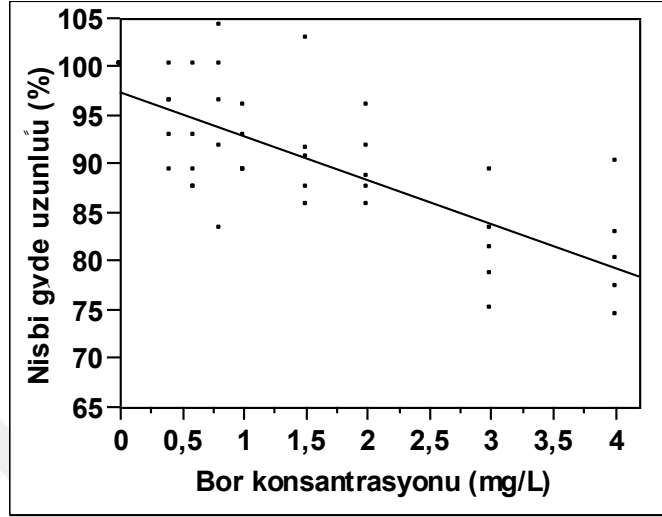
Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen *L. salicaria* fidelerinin nisbi kök uzunlukları karşılaştırıldığında, nisbi kök uzunluğu ile artan B konsantrasyonları arasında istatistiki açıdan negatif bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir ($r = -0,67$; $p < 0,05$). Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen fidelerin kök uzunlukları kontrol grubu ile karşılaştırıldığında ($23,5 \text{ cm} \pm 3,0$), kök uzunluğunda $0,8 \text{ mg B/L}$ 'ye kadar %20'lik bir azalma görülürken ($18,7 \text{ cm} \pm 1,8$), 3 mg/L B konsantrasyonlarında ($16,1 \text{ cm} \pm 1,0$) ise kontrole göre kök uzunluğunda %31'lik azalma tespit edilmiştir (Şekil 3.4).

Şekil 3.4: Artan B Konsantrasyonu İle *L. salicaria* Bitkisinin Nisbi Kök Uzunluğu Arasındaki Korelasyon ($r = -0,67$)

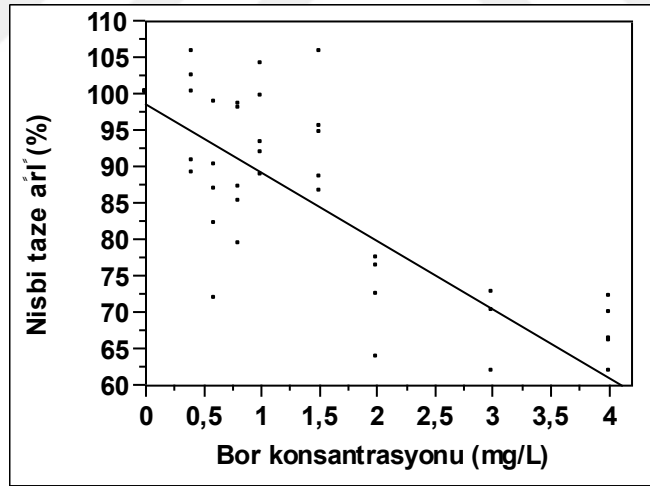


3 mg B/L içeren solüsyonda tespit edilirken ($1,9 \text{ mg} \pm 0,6$), en düşük azalma ise %2,5 ile 1 mg B/L içeren solüsyonda tespit edilmiştir ($2,8 \text{ mg} \pm 0,2$).

Şekil 3.5: Artan B Konsantrasyonu İle *L. salicaria* Bitkisinin Nisbi Gövde Uzunluğu Arasındaki Korelasyon ($r = -0,94$)



Şekil 3.6: Artan B Konsantrasyonu İle *L. salicaria* Bitkisinin Nisbi Taze Ağırlığı Arasındaki Korelasyon ($r = -0,88$)



Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen *L. salicaria* fidelerine ait klorofil a, klorofil b, toplam klorofil ve karotenoid miktarları Tablo 3.2 de verilmiştir.

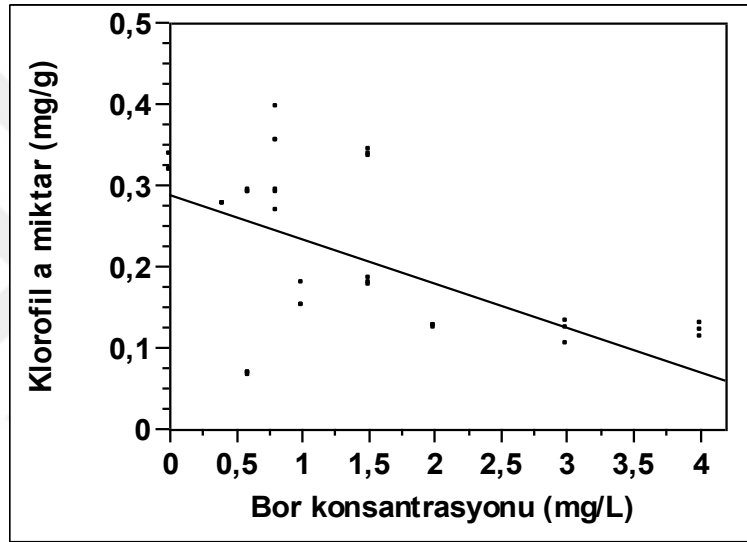
Tablo 3.2: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fidelerinin Pigment İçeriği

	B konsantrasyonları (mg/L)									Korelasyon Katsayısı
	Kontrol	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2	3	4	r
<u>Pigment İçeriği</u>										
<u>(mg/g yaprak)</u>										
Klorofil a	0,32 ± 0,006	0,27 ± 0,000	0,29 ± 0,001	0,28 ± 0,008	0,16 ± 0,010	0,18 ± 0,002	0,12 ± 0,001	0,12 ± 0,009	0,12 ± 0,004	-0,85*
Klorofil b	0,11 ± 0,002	0,16 ± 0,001	0,12 ± 0,000	0,09 ± 0,002	00,04 ± 0,007	0,09 ± 0,001	0,04 ± 0,001	0,07 ± 0,002	0,07 ± 0,002	-0,51
Toplam klorofil	0,43 ± 0,009	0,43 ± 0,001	0,41 ± 0,001	0,38 ± 0,009	0,20 ± 0,003	0,27 ± 0,001	0,17 ± 0,002	0,19 ± 0,008	0,19 ± 0,006	-0,79*
Karotenoid	0,06 ± 0,001	0,03 ± 0,000	0,08 ± 0,001	0,07 ± 0,004	0,07 ± 0,002	0,08 ± 0,01	0,00 ± 0,001	0,06 ± 0,002	0,05 ± 0,002	-0,18

*0,05 seviyesinde önemli

L. salicaria fideleri yaprak klorofil a miktarı ile artan B konsantrasyonu arasında istatistiki açıdan negatif bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir ($r = -0,85$; $p < 0,05$). Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen *L. salicaria* fidelerinin yaprak klorofil a içeriğinin 0,12 mg/g ile 0,29 mg/g arasında değiştiği tespit edilmiştir. En yüksek klorofil a miktarı $0,32 \text{ mg/g} \pm 0,0006$ ile kontrol grubunda hesaplanmış olup klorofil a miktarında 0,4 mg B/L konsantrasyonunda 0,05 mg/g azalma görülürken, 0,6 mg B/L'de 0,03 mg/g azalma görülmüştür (Şekil 3.7).

Şekil 3.7: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fide Yapraklarının Klorofil a Miktarı

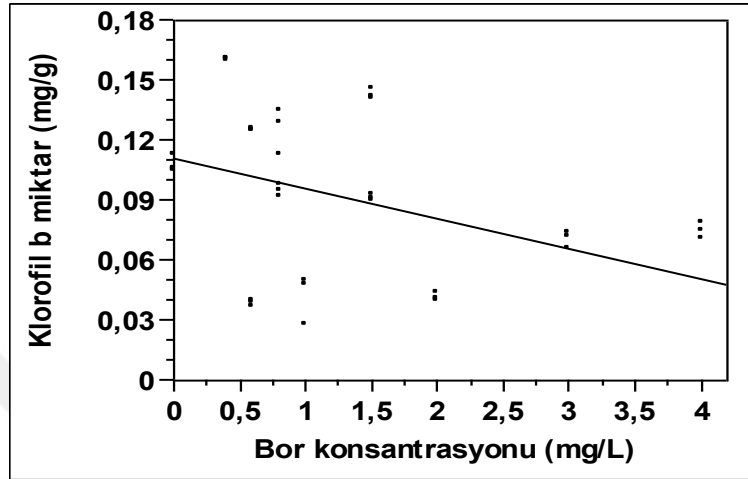


L. salicaria fideleri yaprak klorofil b miktarı ile artan B konsantrasyonu arasında istatistiki açıdan bir ilişkinin olmadığı tespit edilmiştir ($r = -0,51$; $p < 0,05$). Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen *L. salicaria* fidelerinin yaprak klorofil b içeriğinin 0,04 mg/g ile 0,16 mg/g arasında değiştiği tespit edilmiştir. En yüksek klorofil b miktarı $0,16 \text{ mg/g} \pm 0,001$ ile 4 mg B/L'de hesaplanmış olup, kontrol grubu ile karşılaştırıldığında klorofil b miktarında 0,4 mg B/L'de 0,05 mg/g, 0,6 mg B/L'de ise 0,01 mg/g artış görülmüştür. (Şekil 3.8).

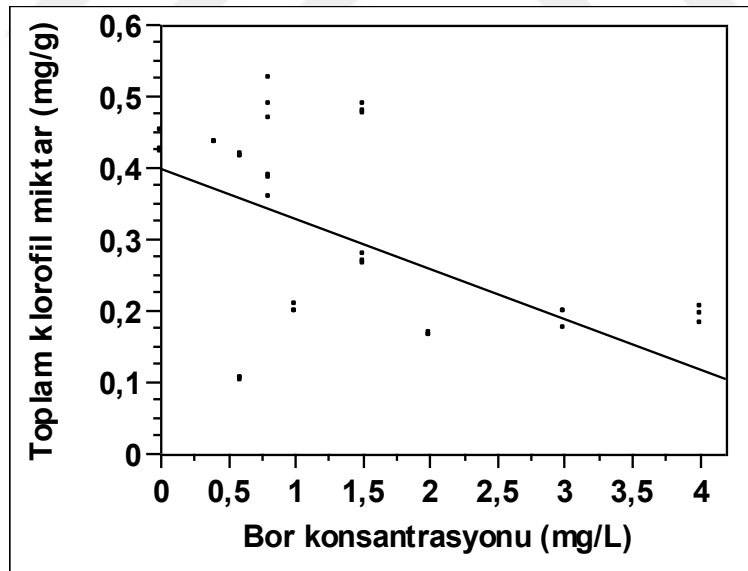
L. salicaria fideleri yaprak toplam klorofil miktarı ile artan B konsantrasyonu arasında istatistiki açıdan negatif bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir ($r = -0,79$; $p < 0,05$). Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen fidelerin yaprak toplam klorofil miktarı ile kontrol grubu karşılaştırıldığında, fidelerin toplam klorofil miktarı en yüksek 0,4 mg

B/L ile kontrol grubunda görülürken en düşük 2 mg B/L içeren solüsyonda yetiştirilen fidelerde görülmüştür (Şekil 3.9).

Şekil 3.8:Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fide Yapraklarının Klorofil b Miktarı

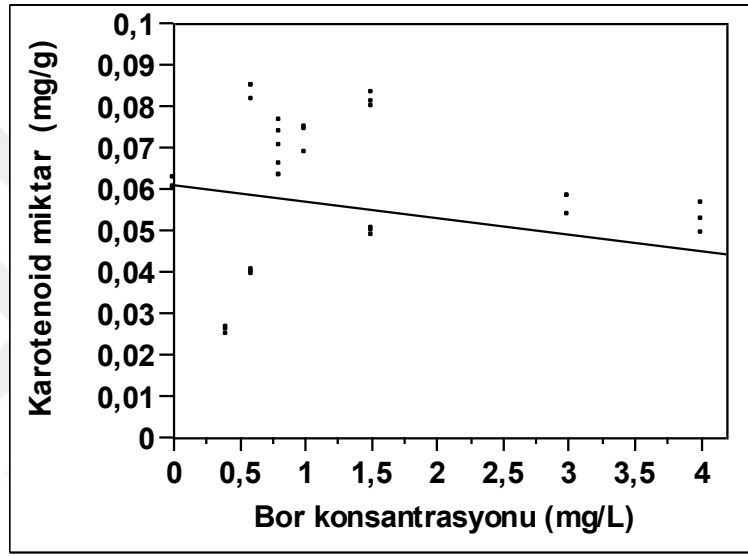


Şekil 3.9: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fide Yapraklarının Toplam Klorofil Miktarı



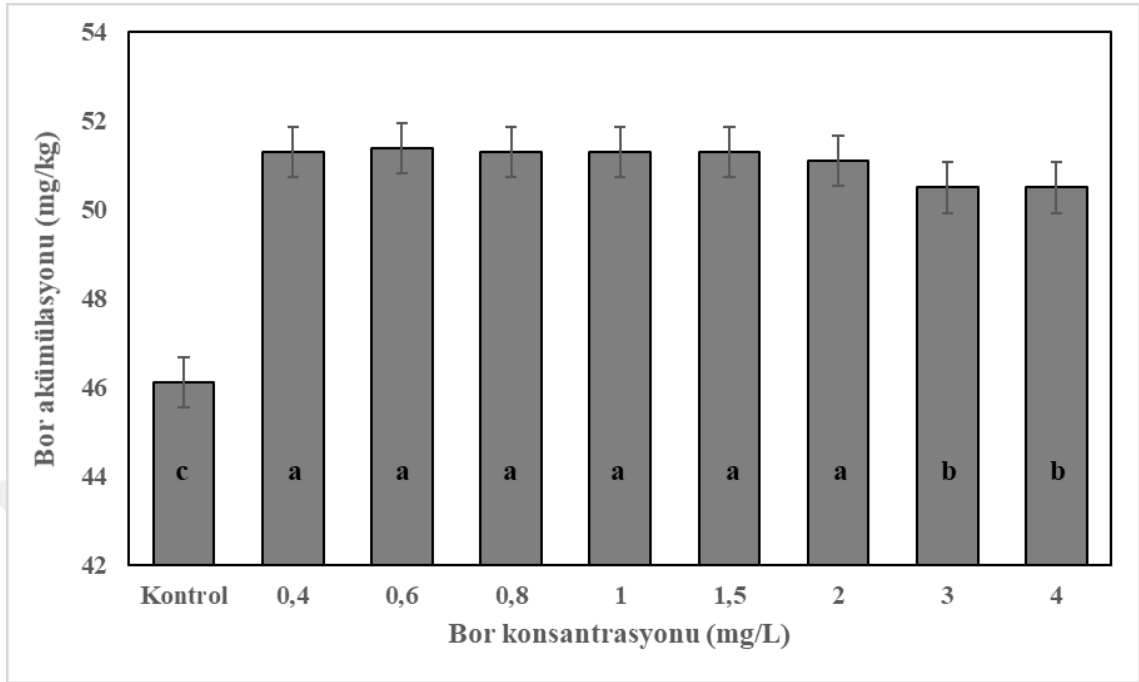
L. salicaria fideleri yaprak karotenoid miktarı ile artan B konsantrasyonu arasında istatistiki açıdan bir ilişkinin olmadığı tespit edilmiştir ($r = -0,18$; $p < 0,05$). Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen fidelerin yaprak karotenoid miktarı ile kontrol grubu karşılaştırıldığında, yaprak karotenoid içeriği en yüksek 0,6 mg B/L ve 1,5 mg B/L solüsyonlarında yetiştirilen fidelerde 0,02 mg/g olarak tespit edilirken, en düşük 2 mg B/L içeren solüsyonda yetiştirilen fidelerde tespit edilmiştir (Şekil 3.10).

Şekil 3.10: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fide Yapraklarının Karotenoid Miktarı



Akümülayon deneylerinden elde edilen verilere göre, farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen *L. salicaria* fidelerinin akümüle ettiği B miktarı istatistiki açıdan farklılık göstermiştir ($F=219,3$; $p < 0,0001$). Bitkinin B'yi en iyi akümüle ettiği konsantrasyon 0,6 mg B/L ($51,5 \text{ mg B/kg} \pm 0,06$) olarak hesaplanmıştır. 3 ve 4 mg B/L konsantrasyonlarında yetiştirilen fidelerde ise B akümülayonunda düşüş tespit edilmiştir ($50,5 \pm 0,21$ ve $50,5 \pm 0,09$, sırasıyla; Şekil 3.11).

Şekil 3.11: Farklı B Konsantrasyonlarında Yetiştirilen *L. salicaria* Fidelerinin B Akümülayon Miktarı (mg/kg)





DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

TARTIŞMA

4.1. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bitkiler ihtiyaç duydukları B'nin %96'sını küçük ve yüksüz formda olan borik asit ve az oranda da borat anyonlarından karşılamakla birlikte, bitkiler için temel bir mikro besin elementi olan B'nin bitki metabolizmasındaki rolü hala tartışılmaktadır. B'nin bitkideki birincil görevi hücre duvarı sentezi ile hücre duvarının yapısını ve bütünlüğünü korumaktır. Ayrıca, bitkide hücre bölünmesi, dokuların vejetatif büyüme ve farklılaşması, translasyon ve transkripsiyon ve baklagillerde nitrojen fiksasyonunda da görev almaktadır (Brđar-Jokanović, 2020; Kumar, vd., 2022).

B toksisite semptomları çoğu bitki için genellikle benzerdir (Archana ve Verma, 2017), Nable (1988) yapmış olduğu çalışmada, arpa ve buğday bitkilerinde B toksisitesi semptomlarının yapraklarda görülen kloroz ve nekrozu olduğunu, ilk olarak yaprak kenarlarında görüldüğünü ve bu semptomun daha sonra yaprağın çoğunu kapladığını tespit etmiştir. Ayrıca yüksek B seviyelerinde yaprak ve gövdede kahverengi lezyon oluşumu, gövde uzunluğunda, kuru madde ağırlığında ve meyve oluşumunda da düşüş tespit edilmiştir (Kumar, vd., 2022; Princi, vd., 2016). Bu çalışmadan elde sonuçlar da yapılan çalışmalarla benzerlik göstermekte olup, 5; 8; 9; 10; 20; 30; 40; 50; 75 ve 100 mg/L B konsantrasyonlarında yetiştirilen *L. salicaria* bitkisinin yapraklarında kloroz ve nekroz belirtileri tespit edilmiştir (Şekil 3.1). Yapılan çalışmalar göstermiştir ki bitkilerin yaşamsal faaliyetlerini sürdürebildiği maksimum B konsantrasyonları türden türe değişiklik göstermektedir (Babaoğlu, vd., 2004; Choudhary, vd., 2020; Eraslan, vd., 2007; Stiles, vd., 2010; Zhao, vd., 2019). Tuzluluğa karşı toleranslı *Tripolium pannonicum*, *Suaeda glauca*, *Iris wilsonii* ve *Puccinellia tenuiflora* türlerinin yaşamlarını sürdürebildiği B konsantrasyonları sırasıyla 40, 250, 700 ve 300 mg B/L olarak tespit edilmiştir (Zhao, vd., 2019). Stiles vd. (2010) yaptıkları çalışmada, *Gypsophila arrosti* bitkisinin 50 mg B/L üzeri konsantrasyonlarda, *Puccinellia distans* bitkisinin ise 1250 mg B/L üzeri konsantrasyonlarda yaşamlarını sürdüremediklerini ortaya koymuşlardır. Ayrıca yapılan diğer çalışmalarda, *Lycopersicon esculentum* ve *Capsicum annuum* bitkilerinin 5 and 50 mg/kg (Eraslan, vd., 2007), *Mentha arvensis* ve *Cymbopogon flexuosus* bitkilerinin 30 mg/kg (Choudhary, vd., 2020), *Gypsophila sphaerocephala* var. *sphaerocephala*, *G. perfoliata*, *Puccinellia distans* subsp. *distans* ve *Elymus elongatus* subsp. *turcicus* bitkilerinin 277 mg/kg B (Babaoğlu, vd., 2004) konsantrasyonlarında yaşamlarını sürdürebildiği belirlenmiştir. Bu çalışmamızda da, bir sulak alan bitkisi olan *L.*

salicaria'nın 5; 8; 9; 10; 20; 30; 40; 50 mg B/L konsantrasyonlarında kloroz ve nekroz belirtileri göstermesine rağmen yaşamını sürdürebildiği, fakat 75 mg B/L konsantrasyonun üzerindeki konsantrasyonlarda yaşamını devam ettiremeyip öldüğü tespit edilmiştir.

Yüksek B konsantrasyonlarında yetiştirilen bitkilerde yapraklarda görülen semptomların aksine köklerde gözle görülür bir belirti gelişmez (García-Sánchez, vd., 2020). Fakat yüksek B konsantrasyonlarında yetiştirilen bitkilerin kök gelişimi optimum B konsantrasyonlarında yetiştirilen bitkilere göre daha zayıftır (Choi, vd., 2007), çünkü yüksek seviyelerde B hücre bölünmesini sınırlayarak kök büyümesini engellediğinden kök uzunluğunda azalmaya sebep olmaktadır (Brown, vd., 2002). Farklı B konsantrasyonlarında yetiştirilen (0; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 ppm) şeker pancarı bitkisinin kök uzunluğuna 0,2 ppm üzeri B konsantrasyonlarının olumsuz etki gösterdiği tespit edilmiştir (Mokhtari, Tazebay ve Kızılgeçi, 2022). Shah vd. (2017)'de yapmış oldukları çalışmada, B toksisitesinde bir turuncgil melezi olan sitrange bitkisinin kök ve gövde gibi büyüme parametrelerinde önemli ölçüde azalma tespit etmişlerdir. 0; 5; 10 ve 20 mM B konsantrasyonlarında yetiştirilen *Ocimum basilicum* bitkisinin kök uzunluğunun kontrol grubuna göre daha düşük olduğu belirlenmiştir (Yolci, vd., 2022). *L. salicaria* bitkisinin nisbi kök uzunluğu artan B konsantrasyonuna bağlı olarak bir azalma göstermiş olup, çalışmamızdan elde ettiğimiz sonuçlar yapılan diğer çalışmalarla benzerlik göstermiştir. *L. salicaria* bitkisinin nisbi gövde uzunluğu artan B konsantrasyonuna bağlı olarak en fazla 4 mg B/L konsantrasyonunda %19 ile azalma göstermiştir. Sarafı vd. (2017) yapmış oldukları çalışmada, %50 oranında hazırlanmış Hoagland besin çözeltisi (kontrol grup) ve 100 µM B konsantrasyonlarında yetiştirilen *Capsicum annuum* fidelerinin boy uzunluklarının artan B konsantrasyonu ile birlikte azaldığını tespit etmişlerdir (47,6 cm ± 4,17 ve 43,2 cm ± 5,33, sırasıyla). Yapılan çalışmalarda, 6,4 mM B konsantrasyonunda yetiştirilen *Cicer arietinum* (Ardic, vd., 2009), 400 µM B konsantrasyonunda yetiştirilen *Oryza sativa* (Riaz, vd., 2021), 30 mg/kg B konsantrasyonunda yetiştirilen *Zea mays* (Nawaz, vd., 2020) ve 90 ppm B konsantrasyonunda yetiştirilen *Carthamus tinctorius* bitkilerinin kök uzunluğunda azalma olduğu belirlenmiştir (Yaman, Katar ve Bayraktar, 2012).

Capsicum annuum fidelerinin kontrol grubunda kök, gövde ve yaprak yaş ağırlıkları en yüksek saptanırken (35,3; 45,6 ve 104,2 g/bitki, sırasıyla), en düşük kök, gövde ve yaprak yaş ağırlıkları 100 mg B/L uygulamasında olduğu ortaya konulmuştur

(13,6; 17,2; 38,2 g/bitki, sırasıyla; Akinci, 2006). *Hordeum vulgare* ile yapılan bir çalışmada bitkinin sürgün ve kök taze ağırlıklarında maksimum artışın 1,5 mg B/L konsantrasyonunda elde edildiği, anca artan B konsantrasyonu ile beraber 6,0 mg B/L konsantrasyonunda her iki parametrenin de azalma gösterdiği tespit edilmiştir (Elfeky, vd., 2012). Bu çalışmamızda artan B konsantrasyonuna bağlı olarak 3 mg B/L konsantrasyonunda yaş ağırlıkta en fazla düşüş tespit edilmiştir (%36).

Kuraklık, soğuk, tuz, sıcaklık, oksidatif stres ve ağır metal toksisitesi fotosentez üzerine etkilidir. Bu saydığımız stres koşulları kloroplastın yapısını bozduğundan klorofil miktarında azalmaya yol açar, bu da daha düşük fotosentetik aktivite ile sonuçlanır (Sherin, Aswathi ve Puthur, 2022). Çatav, Köşkeroğlu ve Tuna (2022) ve Mamani-Huarcaya vd. (2022) yapmış oldukları çalışmalarda artan B konsantrasyonuna bağlı olarak klorofil miktarındaki azalmayı ortaya koymuşlardır. Çatav, Köşkeroğlu ve Tuna (2022) 2 mM ve 4 mM B konsantrasyonundaki artışa paralel olarak, kontrol grubuna göre 2 mM ve 4 mM B konsantrasyonlarında klorofil a ve toplam klorofil miktarında azalma tespit edilirken, karotenoid miktarında her iki B konsantrasyonunda da istatistiksel bir fark tespit edilmemiştir. Bu çalışmada *L. salicaria* bitkisinin klorofil b miktarı ile artan B konsantrasyonu arasında istatistiki açıdan bir fark belirlenmemiştir. Mamani-Huarcaya vd. (2022) iki farklı *Zea mays* varyetesinin klorofil miktarı üzerine B'nin etkisini araştırmış ve 10 mM B konsantrasyonunda 0,05 mM konsantrasyonuna göre klorofil a ve toplam klorofil miktarında düşüş tespit etmişlerdir. Choudhary vd. (2020) çalışmasında, B'nin farklı konsantrasyonlarının 0; 2,5; 5; 10; 20 ve 30 mg/kg, *Mentha arvensis* ve *Cymbopogon flexuosus* bitkilerinin yaprak klorofil miktarına olan etkisini araştırmış ve *M. arvensis* bitkisinde %36,9 ve *C. flexuosus* bitkisinde ise klorofil miktarının %33,4 oranında azaldığını tespit etmiştir.

Chen vd. (2014) yaptıkları deneyde, B'nin farklı konsantrasyonlarının 30 µM (kontrol olarak), B'nin eksik 0 mM ve B toksik 3 mM seviyelerinde *Arabidopsis thaliana* bitkisinin klorofil pigment içeriğini araştırmışlar ve bu çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçlara benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Chen vd. (2014) çalışmasında, 60 sa ve 84 sa süresince farklı B konsantrasyonları uygulanmış *Arabidopsis thaliana* bitkisinin klorofil pigment miktarını belirlemiş ve 3 mM B uygulamasının bitkinin klorofil pigment içeriğinde azalmaya sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

B, bitki büyümesi için gereklidir, ancak aynı zamanda yüksek konsantrasyonlarda da toksiktir (Brđar-Jokanović, 2020). B ile kirlenmiş suların ıslahında adsorpsiyon, iyon değiştirme, ters osmoz, elektrokoagülasyon, elektrodializ ve Ca(OH)_2 ile MgO kullanılarak yapılan çöktürme yöntemleri kullanılmaktadır (Ateş, Bayraktar ve Bilen, 2018). Fakat kullanılan bu yöntemlerin pahalı ve pratik olmaması nedeniyle B ile kirlenmiş alanların ıslahında çevre dostu ve düşük maliyetli yeşil ıslah çalışmalarına başlanmıştır (Del-Campo Marín ve Oron, 2007; Dursun ve Mikailsoy, 2019). B'nin ortamdan yeşil ıslah yolu ile uzaklaştırılmasında *Tripolium pannonicum*, *Iris wilsonii*, *Puccinellia tenuiflora*, *Phragmites australis* ve *Typha latifolia* ile yapılmış çalışmalar bulunmaktadır (Kumar, vd., 2022). *L. salicaria* bitkisinin B akümüasyon kapasitesi bu çalışmada 51,5 mg B/kg olarak hesaplanmıştır. Türker, Böcük ve Yakar (2013) yaptıkları çalışmada, dünyanın en büyük boraks madeninden (Kırka, Türkiye) çıkan B madeni atıklarını arıtmak için oluşturdukları küçük ölçekli yapay sulak alanda, *Typha latifolia* bitkisinin toplam 250 mg/kg, *Phragmites australis* bitkisinin 38 mg/kg B absorbe ettiğini bulmuşlardır. Yıldırım ve Kasım (2018) yaptıkları çalışmada ise, *Populus alba*, *P. nigra*, *P. deltoides*, *P. euramericana*, *Salix viminalis*, *S. babylonica*, *S. anatolica* ve *S. alba* türleri içinde *S. anatolica*'nın B toksisitesine en dayanıklı tür olduğunu ve 4 265 mg/kg B'yi toprak üstü organlarında akümüle edebildiğini ortaya koymuşlardır. Böcük, Yakar ve Türker (2013) yaptıkları çalışmada, 2 711 mg/kg B akümüle edebilen *Lemna gibba*'nın ekotoksikolojik risk değerlendirmelerinde biyomonitör olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca *Myriophyllum elatinoides* bitkisinin sürgününde ve kökünde maksimum B birikiminin sırasıyla 1 296,5 ve 350,7 mg/kg olduğunu tespit edilmiştir (Xia, vd., 2021).

B akümüasyonu ile yapılan araştırmalar değerlendirildiğinde, çalışmamızın materyalini oluşturan *L. salicaria* bitkisinin B'yi dokularında akümüle edebilme yeteneğinden dolayı düşük B konsantrasyonları ile kontamine olmuş suların ıslahı ile ilgili çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdel-Raouf, M. E., vd. (2019). Wastewater treatment methodologies, review article. *International Journal of Environment & Agricultural Science*, 3(1),1-25.
- Ahmed, S. F., vd. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 1-23.
- Akın, M. ve Akın, G. (2007). Suyun önemi, Türkiye’de su potansiyeli, su havzaları ve su kirliliği. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 47(2), 105-118.
- Akinci, I. E. (2006). Effect of boron toxicity on yield and plant characteristics in red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Conference Paper Sept*, 290-295.
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals_Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- Aras, S. ve Fındık, Ö. (2018). Nevşehir ili için Kızılırmak nehri’nin içme suyu potansiyelinin araştırılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 214-222.
- Archana, N. P., & Verma, P. (2017). Boron deficiency and toxicity and their tolerance in plants: a review. *J Global Biosci*, 6, 4958-4965.
- Ardıc, M., vd. (2009). Antioxidant responses of chickpea plants subjected to boron toxicity. *Plant Biology*, 11(3), 328-338.
- Arslan, N. (2013). Invisible face of boron pollution in fluvial ecosystem: the level in the tissues of sentinel and nectonic organisms. *Ambio*, 42(6), 715-23.
- Arslan, P. (2019). *Kirmir çayı su, sediment ve balık (Squalius pursakensis, Capoetabaliki) örneklerinde bazı antropojenik kirleticilerin tespiti ve ekotoksikolojiktiklerinin araştırılması* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15.

- Ateş, Ç., Bayraktar, B. ve Bilen, M. (2018). Yanıt yüzey yöntemi ile bir bor fabrikası atık suyu kimyasal arıtma sürecinde optimum koşulların belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1), 267-278.
- Atıcı, A. A. (2021). Seasonal changes of some detergent components in surface water of rivers to the Van Lake, Turkey. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 103(1), 37-49.
- Aybar, M., Bilgin, A. ve Sağlam, B. (2015). Fitoremediasyon yöntemi ile topraktaki ağır metallerin giderimi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 1(1-2), 59-65.
- Babaoğlu, M., vd. (2004). *Gypsophila sphaerocephala* Fenzl ex Tchihat.: a boron hyperaccumulator plant species that may phytoremediate soils with toxic B levels. *Turkish Journal of Botany*, 28(3), 273-278.
- Başkan, M. B. ve Atalay, N. (2014). İçme ve sulama sularında bor kirliliği ve bor giderme yöntemleri . *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (3) , 78-84.
- Bilgiç, M. ve Dayık, M. (2013). Borun özellikleri ve tekstil endüstrisinde kullanımıyla sağladığı avantajlar. *Electronic Journal of Vehicle Technologies/Tasit Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(2), 27-37.
- Bingöl, A. N., vd. (2021). Effect of zinc on phytoremediation potential and carbonic anhydrase and polyphenoloxidase activities of *Lythrum salicaria* L. *Turkish Journal of Botany*, 45(6), 553-562.
- Bolan, N. S., vd. (2011). Phytostabilization: A green approach to contaminant containment. *Advances in Agronomy*, 112, 146-189.
- Bor-oksijen bileşikleri. (2022, 28 Aralık). Erişim adresi: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/85117/mod_resource/content/0/4.%20Konu.pdf.
- Boron toxicity. (2023, 03 Şubat). Erişim adresi: <https://keys.lucidcentral.org/keys/sweetpotato/key/Sweetpotato%20Diagnoses/Media/Html/TheProblems/MineralToxicities/BoronToxicity/Boron%20toxicity.htm>.
- Böcük, H., Yakar, A., & Türker, O. C. (2013). Assessment of *Lemna gibba* L.(duckweed) as a potential ecological indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent. *Ecological Indicators*, 29, 538-548.

- Brdar-Jokanović M. (2020). Boron Toxicity and Deficiency in Agricultural Plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4), 1-20.
- Brown, P. H., vd. (2002). Boron in plant biology. *Plant biology*, 4(02), 205-223.
- Chen, M., vd. (2014). Proteomic analysis of Arabidopsis thaliana leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and protein synthesis. *Journal of Plant Physiology*, 171, 235-242.
- Choi, E. Y., vd. (2007). The mechanism of boron tolerance for maintenance of root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant, Cell & Environment*, 30(8), 984-993.
- Choudhary, S., vd. (2020). Effects of boron toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant enzymes and essential oil fingerprinting in *Mentha arvensis* and *Cymbopogon flexuosus*. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 7(1), 1-11.
- Çatav, Ş. S., Köşkeröğlu, S., & Tuna, A. T. (2022). Selenium supplementation mitigates boron toxicity induced growth inhibition and oxidative damage in pepper plants. *South African Journal of Botany*, 146, 375-382.
- Dal, İ. ve Dal, Ş. (2021). Bor mineralinin tekstil sanayiinde kullanımı ve Türkiye ekonomisine katkısı. *Pamukkale Journal of Eurasian Socioeconomic Studies*, 8(2), 53-69.
- Davis, P. H. (1972). Flora of Turkey and the east eagean island. *Edinburgh at The University Press*, 4, 174-175.
- De Abreu, C. A., vd. (2012). Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments. *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 3-7.
- Degryse, F. (2017). Boron fertilizers: use, challenges and the benefit of slow-release sources—a review. *Journal of Boron*, 2(3), 111-122.
- Del-Campo Marin, C. M., & Oron, G. (2007). Boron removal by the duckweed *Lemna gibba*: a potential method for the remediation of boron-polluted waters. *Water Research*, 41(20), 4579-4584.

- Dorak, S., Aşık, B. B. ve Özsoy, G. (2019). Tarımda su kalitesi ve su kirliliğinin önemi: Bursa Nilüfer çayı örneği. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(1), 155-166.
- Dursun, S. A. ve Mikailsoy, F. (2019). Borlu toprakların ıslahı için gerekli yıkama suyunun belirlenmesine yönelik matematiksel modellerin elde edilmesi. *Journal of Boron*, 4(1), 53-59.
- Dünya dilsiz siyasi haritası. (2023, 02 Ocak). Erişim adresi: http://cografyaharita.com/haritalarim/3fdunya-dilsiz-siyasi-haritasi_cr.png
- Ediz, N. ve Özdağ, H. (2001). Bor mineralleri ve ekonomisi. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (002), 133-151.
- El-Feky, S. S., vd. (2012). Effect of elevated boron concentrations on the growth and yield of barley ('*Hordeum vulgare*'L.) and alleviation of its toxicity using different plant growth modulators. *Australian Journal of Crop Science*, 6(12), 1687-1695.
- Emiroğlu, Ö., vd. (2010). Boron concentration in water, sediment and different organisms around large borate deposits of Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 84(4), 427-431.
- Eraslan, F., vd. (2007). Boron toxicity alters nitrate reductase activity, proline accumulation, membrane permeability, and mineral constituents of tomato and pepper plants. *Journal of Plant Nutrition*, 30(6), 981-994
- Eti Maden ile ilgili sorular. (2022, 30 Aralık). Erişim Adresi: <https://www.etimaden.gov.tr/sik-sorulan-sorular>
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü. (2022). *Bor sektörü raporu*. Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.
- García-Sánchez, F., vd. (2020). Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. *Journal of Hazardous Materials*, 397, 1-8.
- Gavrilescu, M. (2022). Enhancing phytoremediation of soils polluted with heavy metals. *Current Opinion in Biotechnology*, 74, 21-31.
- González, A.G., vd. (2017). Bioadsorption of heavy metals. *Prospects and Challenges in Algal Biotechnology*, 233-255.

- Grieve, M. (Eds.). (1974). *A Modern Herbal*. New York: Hafner Publishing.
- Gunatilake, S. K. (2015). Methods of Removing Heavy Metals from Industrial Wastewater. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, 1(1), 12-18.
- Gür, N., Türker, O. C., & Böcük, H. (2016). Toxicity assessment of boron (B) by *Lemna minor* L. and *Lemna gibba* L. and their possible use as model plants for ecological risk assessment of aquatic ecosystems with boron pollution. *Chemosphere*, 157, 1-9.
- Hadrup N., Frederiksen M., & Sharma A. K. (2021). Toxicity of boric acid, borax and other boron containing compounds: A review. *Regul Toxicol Pharmacol*, 121, 1-9.
- Hamutoğlu, R., vd. (2012). Biyosorpsiyon, adsorpsiyon ve fitoremediasyon yöntemleri ve uygulamaları. *Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 69(4), 235-253.
- Helvacı, C., & Palmer, M. (2017). Origin and distribution of evaporite borates: the primary economic sources of boron. *elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 13(4), 249-254.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water- culture method for growing plants without soil. *Circular. California Agricultural Experiment Station*, 347, 4-32.
- Jia, H., vd. (2016). Rhizodegradation potential and tolerance of *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh in phenanthrene and pyrene contaminated sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 112-118.
- JMP. (2005). *JMP SAS statistical analysis system*. Cary, North Carolina, USA.
- Junior, C, A, S., vd. (2021). Is it possible to detect boron deficiency in eucalyptus using hyper and multispectral sensors?. *Infrared Physics & Technology*, 116, 2-7.
- Kaçar, B. (2012). *Temel bitki besleme* (İkinci Baskı). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kharwade, A. M., vd. (2020). Remediation of contaminated soil using Indian mustard through phytoremediation technique. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, 4(10), 1-8.
- Kocaçalışkan, İ. (2008). *Bitki fizyolojisi*. (Yedinci Baskı). Ankara: Nobel Yayın.

- Kumar, V., vd. (2020). Assessment of heavy-metal pollution in three different Indian water bodies by combination of multivariate analysis and water pollution indices. *Human & Ecological Risk Assessment*, 26(1), 1-16.
- (2021). Phytoextraction of heavy metals and ultrastructural changes of *Ricinus communis* L. grown on complex organometallic sludge discharged from alcohol distillery. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 1-14.
- (2022). Biogeochemical cycling, tolerance mechanism and phytoremediation strategies of boron in plants: A critical review. *Chemosphere*, 300, 1-13.
- Kuru, R., vd. (2020). Boron concentrations in tap water in many cities of Turkey, *Toxicological & Environmental Chemistry*, 102(5-6), 240-249.
- Liu, Z., & Tran, K. Q. (2021). A review on disposal and utilization of phytoremediation plants containing heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 226, 1-13.
- Mamani-Huarcaya, B. M., vd. (2022). Characterization of two peruvian maize landraces differing in boron toxicity tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 185, 167-177.
- Marschner, H. (2011). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). San Diego: Academic Press.
- Millas, I. G. (2020). Boron industry, sources, and evaporitic andean deposits: geochemical characteristics and evolution paths of the superficial brines. In Aydın, M (Eds.), *Plant adaptation and phytoremediation* (pp. 1-24). London, United Kingdom: Intech Open.
- Mitich, L. W. (1999). Purple loosestrife, *Lythrum salicaria* L.. *Weed Technology*, 13(4), 843-846.
- Mokhtari, N. E. P., Tazebay, N. ve Kızılgeçi, F. (2022). Bor uygulamasının şeker pancarında çimlenme ve erken gelişim dönemindeki etkilerinin araştırılması. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 10(1), 29-33.
- Nable, R. O. (1988). Resistance to boron toxicity amongst several barley and wheat cultivars: a preliminary examination of the resistance mechanism. *Plant and Soil*, 112(1), 45-52.

- Nassouhi, D., vd. (2018). Ağır metal kirliliğinin biyoremediasyonunda bazı su içi ve yüzücü sucul makrofitlerin kullanımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi Dergisi*, 14(2), 148-165.
- Nawaz, M., vd. (2020). Salicylic acid improves boron toxicity tolerance by modulating the physio-biochemical characteristics of maize (*Zea mays* L.) at an early growth stage. *Agronomy*, 10(12), 1-15.
- Odinga, C. A., vd. (2019). Rhizofiltration system consisting of *phragmites australis* and *Kyllinga nemoralis*: evaluation of efficient removal of metals and pathogenic microorganisms. *Desalination and Water Treatment*, 169, 120-132.
- Ozturk, M., vd. (2010). Boron and plants. In Ashraf, M., Ozturk, M. ve Ahmad, M.S.A (Eds.), *Plant adaptation and phytoremediation* (pp. 275-311). New York, NY, USA: Springer.
- Özkul, C., Çiftçi, E., & Savaş, M. (2017). Boron as an exploration tool for terrestrial borate deposits: A soil geochemical study in Neogene Emet-Hisarcık basin where the world largest borate deposits occur (Kütahya-western Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*, 173, 31-51.
- Öztürk, S. E., vd. (2018). Transcriptomic analysis of boron hyperaccumulation mechanisms in *Puccinellia distans*. *Chemosphere*, 199, 390-401.
- Parks, J. L., & Edwards, M. (2005). Boron in the environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(2), 81-114.
- Princi, M. P., vd. (2016). Boron toxicity and tolerance in plants: Recent advances and future perspectives. In Ahmad, p (Eds.), *Plant Metal Interaction: Emerging Remediation Techniques* (pp. 115-147). Amsterdam: Elsevier.
- Rámila, C. D. P., vd. (2015). Boron accumulation in *Puccinellia frigida*, an extremely tolerant and promising species for boron phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*, 150, 25-34.
- Reeves, R. D., vd. (2017). A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist*, 218(2), 407-411.

- Riaz, M., vd. (2021). Boron-toxicity induced changes in cell wall components, boron forms, and antioxidant defense system in rice seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 216, 1-9.
- Saleh, T. A., Mustaqeem, M., & Khaled, M. (2021). Developing water treatment technologies in removing heavy metals from wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17,1-44.
- Sanayinin stratejik ham maddesi: Bor. (2023, 01 Ocak). Erişim adresi: <https://www.etimaden.gov.tr/bor-mineralleri>
- Sarafi, E., vd. (2017). Melatonin and resveratrol reverse the toxic effect of high boron (B) and modulate biochemical parameters in pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 112, 173-182.
- Shah, A., vd. (2017). Deficiency and toxicity of boron: Alterations in growth, oxidative damage and uptake by citrange orange plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145, 575-582.
- Sherin, G., Aswathi, K. R., & Puthur, J. T. (2022). Photosynthetic functions in plants subjected to stresses are positively influenced by priming. *Plant Stress*, 4, 1-12.
- Siddiqui, E., & Pandey, J. (2019). Assessment of heavy metal pollution in water and surface sediment and evaluation of ecological risks associated with sediment contamination in the Ganga River: A basin-scale study. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 10926-10940.
- Simón-Grao, S., vd. (2018). Response of three citrus genotypes used as rootstocks grown under boron excess conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 159, 10-19.
- Singh, A., vd. (2022). Biological remediation technologies for dyes and heavy metals in wastewater treatment: New insight. *Bioresource Technology*, 343, 1-12.
- Stiles, A. R., vd. (2010). Mechanisms of boron tolerance and accumulation in plants: a physiological comparison of the extremely boron-tolerant plant species, *Puccinellia distans*, with the moderately boron-tolerant *Gypsophila arrostil*. *Environmental Science & Technology*, 44(18), 7089-7095.

- Subpiramaniyam, S. (2021). *Portulaca oleracea* L. for phytoremediation and biomonitoring in metal-contaminated environments. *Chemosphere*, 280, 1-15.
- Thompson, D. Q., Stucky, R. L. ve Thompson, E. B. (1987). *Spread, impact, and control of purple loosestrife (Lythrum salicaria) in north american wetlands*. United States Department of the Interior Fish and Wildlife Service: Washington, DC.
- Turhan, A. ve Kuşçu, H. (2020). Sulama suyu bor kapsamaları ile kırmızı biber bitkisinin verim ve kalite karakteristikleri arasındaki ilişkiler. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 34(1), 201-212.
- Türker, O. C., Böcük, H., & Yakar, A. (2013). The phytoremediation ability of a polyculture constructed wetland to treat boron from mine effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 252, 132-141
- Türkiye'nin yükselen değeri: Bor, (2022, 30 Aralık). Erişim adresi: <https://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor>.
- Usta, A. (2016). Türkiye'nin su potansiyelinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. *Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi*, 3(2) , 01-09.
- Uveges, J. L., Corbett, A. L., & Mal, T. K. (2002). Effects of lead contamination on the growth of *Lythrum salicaria* (purple loosestrife). *Environmental Pollution*, 120(2), 319-323.
- Vera, A., vd. (2021). Interactive impacts of boron and organic amendments in plant-soil microbial relationships. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 1-13.
- Wang, M., vd. (2021). Concept and types of bioremediation. In Hasanuzzaman.M & Prasad. M. N. V (Eds.), *Handbook of bioremediation* (pp. 3-8). Academic Press.
- Woods, W. G. (1994). An introduction to boron: History, sources, uses, and chemistry. *Environmental Health Perspectives*, 102(7), 5-11.
- Xia, J., vd. (2021). *Myriophyllum elatinoides*: A potential candidate for the phytoremediation of water with low level boron contamination. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 1-11.

- Yaman, H., Katar, D., & Bayraktar, N. (2012). Determination of boron toxicity on safflower varieties (*Carthamus tinctorius* L.) during sprout and early seedling growth. *Journal of Field Crops Central Research Institute*, 21(1), 8-15.
- Yıldırım K., & Kasım G.Ç. (2018). Phytoremediation potential of poplar and willow species in small scale constructed wetland for boron removal. *Chemosphere*, 194, 722-736
- Yiğitbaşoğlu, H. (2004). Türkiye için önemli bir maden: Bor. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 2(2), 13-25.
- Yolci, M. S., vd. (2022). Effect of different boron concentrations and rhizobacteria applications on physiological and biochemical properties of purple basil (*Ocimum basilicum*) plant. *Journal of Elementology*, 27(3), 471-488.
- Zhang, P., vd. (2022). Metal resistant gut microbiota facilitates snails feeding on metal hyperaccumulator plant *Sedum alfredii* in the phytoremediation field. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 236,1-10.
- Zhao, Q., vd. (2019). Boron tolerance and accumulation potential of four salt-tolerant plant species. *Scientific Reports*, 9(1), 1-8.

DİZİN

-A-

Akümülayon, i, ii, iii, v, xii, 12, 32, 33

-B-

Bor, i, v, viii, 1, 3, 8, 12, 20

-F-

Fideler, xi, 18, 19, 25

Fitoremediasyon, viii, 9, 18

-G-Gövde, v, 9, 14, 18, 19, 20, 21, 23, 26,
27, 35, 36**-H-**

Hiperakümülatör, x, 12

Hoagland, 17, 18, 19, 36, 43

-K-

Karotenoid, 20, 21, 28, 32, 37

Klorofil, v, 1, 8, 13, 20, 21, 28, 29, 30,
37Kök, v, 9, 11, 14, 18, 19, 21, 23, 26, 27,
36**-N-**

Nisbi, v, 21, 23, 27, 36

-S-Salicaria, i, ii, iii, v, vi, x, xi, xii, 1, 13,
16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26,
27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37,
38, 40, 45, 47**-T-**

Tohum, xi, 23

Toksisite, 8, 35

-Y-Yaprak, v, 1, 9, 18, 19, 20, 29, 30, 32,
35, 36, 37

Yöntem, 10, 11