

Ekstrem Bor Konsantrasyonlarında *Lemna minor* ile Acil Durum Fitoremediasyonu: Toksisite Sınırlarını Aşan Bir Yaklaşım

Bahar YAVUZTÜRK GÜL^{1,2*}

¹ Çevre Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

* bygul@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 25/11/2025;

Kabul/Accepted: 09/02/2026)

Öz: Bor, çeşitli endüstriyel faaliyetler nedeniyle sucul ortamlarda birikerek toksik etkilere yol açabilmektedir. Bu çalışma, geleneksel toksik sınırların çok üzerindeki bor konsantrasyonlarında, acil durum müdahalesi için *Lemna minor*'un bor birikim (akümülyasyon) kapasitesini değerlendirmektedir. Bu amaçla *Lemna minor* bitkisinin 300–3000 mg/L bor konsantrasyonlarına 7 gün süreli maruziyeti sonucunda gösterdiği büyüme tepkisi, bor birikimi ve fizyolojik değişimleri değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında RGR (relatif büyüme hızı), klorofil içeriği, biyokonsantrasyon faktörü (BCF), çözeltide kalan bor oranları ve bitkinin biriktirdiği bor miktarı analiz edilmiştir. Sonuçlar, bitki büyümesinin ve klorofil sentezinin yüksek bor seviyelerinde baskılandığını, ancak *Lemna minor*'un ekstrem bor konsantrasyonlarında dahi etkili bor birikimi gerçekleştirebildiğini ve artan çözelti bor konsantrasyonuna bağlı olarak bor birikiminin anlamlı şekilde arttığını göstermiştir. 3000 ppm ekstrem bor seviyede yaklaşık 39 mg/g DW birikim gözlemlenmiştir. 300 ppm bor çözeltisinde deney sonunda 28,9 (L/kg) maksimum BCF değerine ulaşılmıştır. Elde edilen bulgular, *Lemna minor*'un toksisite sınırlarını aşan bor konsantrasyonlarında dahi, bitki sağlığının korunmasının öncelikli olmadığı, ancak hızlı bor gideriminin gerekli olduğu durumlarda sınırlı sürelerle etkili bir fitoremediasyon ajanı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: fitoremediasyon, *Lemna minor*, bor, BCF, klorofil, RGR.

Emergency Phytoremediation with *Lemna minor* at Extreme Boron Concentrations: An Approach Beyond Toxicity Limits

Abstract: Boron accumulation in aquatic environments due to various industrial activities can lead to severe toxicity. This study evaluates the boron accumulation capacity of *Lemna minor* for emergency response scenarios at boron concentrations far exceeding traditional toxicity limits. For this purpose, the growth inhibition, boron accumulation, and physiological responses of *Lemna minor* were evaluated during a 7-day exposure to boron concentrations of 300–3000 mg/L. Parameters such as relative growth rate (RGR), chlorophyll content, bioconcentration factor (BCF), residual boron ratios and the amount of boron accumulated by the plant were evaluated. The results indicated that while plant growth and chlorophyll synthesis were suppressed at high boron levels, *Lemna minor* demonstrated effective boron accumulation even at extreme concentrations, and boron accumulation significantly increased with rising solution concentrations. The highest boron accumulation of approximately 39 mg/g dry weight (DW) was observed at the extreme boron level of 3000 mg/L and a maximum BCF value of 28.9 L/kg was achieved in the 300 mg/L boron solution. These findings suggest that *Lemna minor* can serve as an effective phytoremediation agent for limited periods in situations requiring rapid boron uptake, even at concentrations exceeding toxicity limits where preserving plant health is not the primary priority.

Keywords: phytoremediation; *Lemna minor*; boron; BCF; chlorophyll; RGR.

1. Giriş

Bor (B) elementinin çevrede yaygın olarak bulunması ve başta cam, seramik, tarım, deterjan ve nükleer endüstriler olmak üzere çeşitli sanayi faaliyetlerinde yoğun şekilde kullanılması, sucul ortamlarda bor birikimine neden olmaktadır. Ülkemiz, dünya bor rezervinin yaklaşık %70'ine sahiptir ve yoğun bor madenciliği faaliyetlerinin yürütüldüğü bir ülkedir [1]. Bu durum, özellikle bor maden sahalarına yakın sulak alanlar ve yüzey sularında ciddi bor kontaminasyon risklerini beraberinde getirmektedir [2], [3].

Bor, bitki metabolizması için mikro düzeyde gerekli bir element olmasına rağmen, konsantrasyon arttıkça toksik etki göstermektedir [4]. Bor, bitki gelişimi için elzem bir element olmakla birlikte, endüstriyel atıksular, maden drenaj suları ve sulama sularında sıklıkla aşırı konsantrasyonlarda bulunabilmektedir. Suda yüksek

* Sorumlu yazar: bygul@itu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-5048-7879

konsantrasyonlarda bulunan bor, sucul organizmalar üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmekte ve insanlar ile hayvanlar açısından potansiyel sağlık riski oluşturmaktadır [5].

Türkiye'de çeşme suyundaki bor konsantrasyonu, bölgeye ve mevsime bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Genel olarak, şehir şebeke sularında bor seviyeleri düşük olup, bor yataklarına yakın bölgelerde bu değerler artış gösterebilir. Türkiye genelinde 75 şehirden toplanan 335 çeşme suyu örneğinde 0,001 – 5,5 mg/L (ppm) aralığında olduğu tespit edilmiştir [6]. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), bor için kabul edilebilir limit değeri 2,4 mg/L olarak bildirmiştir [7]. Ancak endüstriyel kirlilik sonucu bu sınırın binlerce katı değerlere ulaşılabilir.

Konvansiyonel su arıtma sistemlerinde bor giderim verimi genellikle oldukça düşük olduğu için, bor giderimine yönelik çöktürme-koagülasyon, iyon değişimi, çözücü ekstraksiyonu, ultrafiltrasyon ve bor-selektif reçinelerle adsorpsiyon, ters osmos gibi çeşitli spesifik teknikler geliştirilmiştir [8]. Ancak bu yöntemlerin büyük çoğunluğu yüksek işletme ve bakım maliyetleri ile kimyasal madde kullanımına bağlı çevresel sorunlar barındırmaktadır [9]. Dolayısıyla, sudan bor giderimi için daha basit, ekonomik ve çevre dostu teknolojilerin araştırılması gereklidir. Özellikle bor maden sahalarında, cevherlerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan atık sular ve yer altı sularında bor konsantrasyonları oldukça yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Örneğin Türkiye'deki bazı bor maden işletmelerinin endüstriyel atık sularında bor konsantrasyonu 3000 mg/L'yi aşabilmektedir [10], [11]. Bu yüksek konsantrasyonlar hem çevresel etki değerlendirme süreçlerinde hem de su arıtma teknolojilerinin tasarımı açısından dikkate alınması gereken kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Fitoremediasyon, bitkilerin kirleticileri absorblama, adsorblama veya metabolize etme yeteneklerinden faydalanarak çevresel kirleticilerin sudan uzaklaştırılmasını amaçlayan çevre dostu bir arıtma yöntemidir [12]. Su mercimeği dünyanın birçok bölgesinde yayılım gösteren, küçük yapılı ve serbest yüzen bir sucul angiospermdir [13]. *Lemna* türü hızlı büyüme hızı, kolay biyokütle üretimi ve ağır metalleri absorblayabilme yeteneği nedeniyle bor gibi metal(loid) kirliliklerinde sıklıkla incelenmektedir [14].

Lemna cinsi bitkiler bor giderimi açısından potansiyel bir biyolojik aday olarak değerlendirilmiştir [5], [9], [15], [16], [17]. Önceki çalışmalar, su mercimeğinin farklı çevresel koşullar altında bora tolerans gösterme ve boru uzaklaştırma yeteneğini ortaya koymuştur. Örneğin, yaygın türlerden biri olan *Lemna minor*, farklı koşullar altında boru farklı oranlarda tolere edebilmekte ve bünyesinde biriktirebilmektedir [18]. Yine yaygın bir tür olan *Lemna gibba*, yapılan bir çalışmada 2-25 mg/L B konsantrasyonlarında etkili B giderimi sağlamıştır [9], [15]. Bununla birlikte literatürde Lemnaceae türlerinin bor giderimi üzerindeki çalışmaları daha çok 2–200 mg/L B gibi düşük ve orta düzey konsantrasyonlara odaklanmıştır [19].

Bilimsel çalışmalar, *Lemna* türlerinin, 8 mg/L ve üzeri bor konsantrasyonlarına maruz kaldıklarında toksik etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur [16]. Bu etkiler arasında yaprak sayısında azalma, klorofil içeriğinde düşüş ve genel büyüme inhibisyonu bulunmaktadır. Çalışmada 4 günlük maruziyetin ardından *Lemna minor* için EC₅₀ değeri 15,1 mg/L olarak belirlenmiştir. 7 günlük maruziyetin ardından *Lemna gibba* için EC₅₀ değeri ise 29,2mg/L olarak rapor edilmiştir. Cui vd. (2024) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise EC₅₀ değeri 18,4 ve 24,4 mg/L olarak hesaplanmıştır [20]. Bu çalışmalarda hesaplanan toksisite değerlerindeki farklılık, test ölçeği, test süresi ve/veya kullanılan bor kaynağındaki farklılıklardan kaynaklanıyor olabilir.

Bazı durumlarda örneğin maden işletmelerinin yüksek yüklü atık sularında, endüstriyel kazalar, maden sızıntıları veya borlu atık suların arıtılmadan sucul ortamlara verilmesi gibi acil durumlarda kısa sürede etkili müdahale yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, boru sınırlı bir süre içinde yüksek oranda uzaklaştırabilen bitkilerin kullanımı önem kazanmaktadır. Ancak toksisite sınırlarının çok üzerinde acil fitoremediasyon denemeleri literatürde bir boşluk olarak değerlendirilmiştir.

Bu nedenle bu çalışmada, *Lemna minor*'un 300–3000 ppm arası bor konsantrasyonlarında büyüme tepkisi, bor biriktirme potansiyeli ve fizyolojik yanıtları (klorofil a, b içerikleri) değerlendirilmiş; bu türün toksik üst sınırların çok üzerindeki koşullarda, bitki sağlığı öncelenmeden boru ne ölçüde uzaklaştırılabileceği ortaya konmuştur. Bu yönüyle çalışma, *Lemna minor*'un toksisite odaklı değerlendirilmesinin ötesine geçerek, onu "acil müdahale fitoremediasyon ajanı" olarak önermeyi hedeflemektedir.

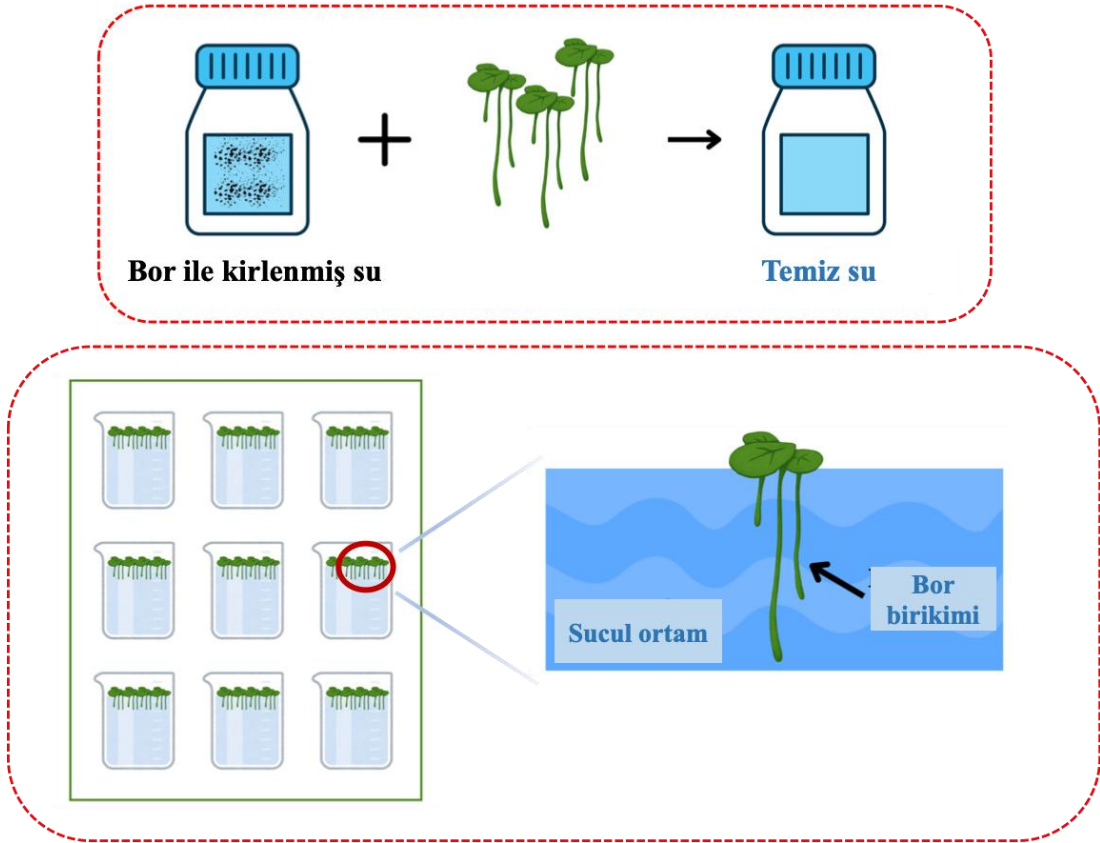
2. Materyal ve Yöntem

2.1 *Lemna minor* kültürlerinin hazırlanması

Deneyde kullanılan *Lemna minor* kültürleri, İstanbul, Türkiye'deki bir akvaryum mağazasından temin edilmiş ve deneysel uygulamalara başlamadan önce bitkiler bir hafta süreyle aklimasyon sürecine tabi tutulmuştur. *Lemna minor* örnekleri, laboratuvar koşullarında yarı seyreltilmiş Hoagland besin çözeltisi içerisinde çoğaltılmıştır [21].

2.2 Deney düzeneği

Bor giderim verimini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneylere ait düzeneğin temsili gösterimi **Şekil 1**'de verilmiştir. Akliye edilen *Lemna minor*, 250 mL hacimli polipropilen kaplara yerleştirilmiş ve her kaba 200 mL yarı seyreltilmiş Hoagland çözeltisi eklenmiştir. Her bir kapta 1,5 gram (yaş ağırlık) su mercimeği kullanılmıştır. Bor konsantrasyonu, yarı Hoagland çözeltisine borik asit (H_3BO_3) ilave edilerek ayarlanmış ve deneysel gruplar 300, 600, 1200 ve 3000 mg/L olacak şekilde beş farklı konsantrasyonda hazırlanmıştır. Kontrol grubu olarak çeşme suyu kullanılmıştır. Kontrol grubunda çeşme suyu ve deney gruplarında besin çözeltisi ortamların kullanılması, bor toksisitesinin şiddetini doğrulamak adına stratejik bir yaklaşımdır. Her bir uygulama üç tekrarlı çalışılmıştır ($n=3$). Deney boyunca çözeltilerin pH'ı 0,1 M NaOH kullanılarak 6,0–7,0 aralığında tutulmuştur. Çalışma, laboratuvar ortamında doğal gün ışığı koşullarında yürütülmüştür. Bitkiler, doğrudan güneş ışığına maruz bırakılmadan, dolaylı doğal gün ışığı altında ve o döneme ait (Nisan-Mayıs) doğal fotoperiyot döngüsünde inkübe edilmiştir. Enerji girdisi gerektirmeyen pasif arıtma sistemlerini simüle etmek amacıyla yapay aydınlatma kullanılmamış, bitkiler deneyin yapıldığı döneme ait doğal fotoperiyot döngüsünde inkübe edilmiştir. Ortam sıcaklığı deney süresince 23 ± 2 °C arasında değişmiştir. Deney süresince buharlaşma/numune alımı nedeniyle meydana gelen hacim azalmaları günlük olarak kaydedilmiştir. Çözücü kaybının neden olacağı konsantrasyon artışı hatasını elimine etmek amacıyla, sisteme dışarıdan su eklenmemiş; bunun yerine giderim verimi hesaplamaları kütle dengesi esas alınarak yapılmıştır. Her ölçüm noktasındaki net bor miktarı, o andaki anlık hacim ve ölçülen konsantrasyon çarpımı üzerinden hesaplanmıştır



Şekil 1. *Lemna minor*'un ekstrem bor konsantrasyonlarında fitoremediasyon potansiyelini incelemek için kurulan deney düzeneği

2.3 Su ve bitki örneklerinde bor tayini

Sıvı numuneler için deney süresi boyunca, her bir deney kabından 1., 2., 4. ve 7. günlerde numune alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sıvı örnekler, 0,45 µm membran filtreden geçirilmiş ve 4 °C'de saklanmıştır. Bitki

örneklerinde biriken borun analizi için deney sonunda *Lemna minor* biyokütlesi toplanmış, deiyonize su ile iyice durulanmıştır. Bitki yüzeyindeki su, emici kağıtla dikkatlice uzaklaştırılmıştır. Her kaptaki örneğin taze ağırlığı (FW) belirlenmiş; daha sonra 0,1 g taze örnek klorofil analizi için ayrılmıştır. Kalan örnekler 80 °C’de 48 saat boyunca kurutularak kuru ağırlık (DW) elde edilmiştir [9]. Kurutulan bitki örneklerinde bor birikimi analizi yapılmıştır. Bunun için her örnek, ayrı ayrı toz haline getirilmiş ve ardından asit sindirimi işlemi uygulanmıştır. Bu işlem 5 mL nitrik asit (HNO₃) ve 1 mL %30’luk hidrojen peroksit (H₂O₂) kullanılarak 90 °C’de 4 saat süreyle gerçekleştirilmiştir [22]. Elde edilen sindirilmiş çözelti, 0,45 µm membran filtreden süzölmüş ve uygun şekilde seyreltilmiştir. Hem sıvı hem de asit sindirimi uygulanmış bitki örneklerinde bor içeriği, ICP-OES (AGILENT 5110) ile analiz edilmiştir. Sonuçlar mg/kg kuru ağırlık (DW) cinsinden ifade edilmiştir.

Çözeltide kalan ve bitkide biriken bor miktarı aşağıdaki (1) ve (2) numaralı formüller kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Çözeltideki } B \text{ (mg)} = \text{ICP sonucu (mg/L)} \times (\text{Çözelti kalan hacmi (ml)}/1000) \quad (1)$$

$$\text{Bitkide biriken } B \text{ (mg)} = \text{ICP sonucu (mg/kg DW)} \times \text{Dry Weight (kg)} \quad (2)$$

2.4 Biyokonsantrasyon faktörü (BCF) tayini

Lemna bitkisinin bor elementini dokularında biriktirme kapasitesini değerlendirmek amacıyla, biyokonsantrasyon faktörü (BCF) hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında BCF tayini, Sitarska vd. (2023) tarafından önerilen yönteme uygun olarak gerçekleştirilmiştir [23]. BCF değeri, organizmanın çevresinden bir elementi ne ölçüde absorbe ettiğini ve bünyesinde biriktirdiğini gösteren önemli bir göstergedir. Bitki dokularında yüksek BCF değerlerinin elde edilmesi, söz konusu türün fitoremediasyon uygulamaları için potansiyel taşıdığını göstermektedir. Literatürde, BCF değeri sınıflandırılırken, BCF>1 olan türler hiperakümülatör olarak tanımlanmakta ve çevresel kirleticilerin biyolojik arıtımında daha etkin oldukları kabul edilmektedir [24]. Bitki örnekleri asit sindirimi uygulanarak ICP-OES cihazı ile analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen verilere dayanarak her bir deney koşuluna ait BCF değeri hesaplanmış ve borun biyo-birikim davranışı değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada bor için BCF değeri, (3) numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır [25]:

$$BFC = \frac{[B(\text{mg/kg})]_{\text{bitki}}}{[B(\text{mg/L})]_{\text{çözelti}}} \quad (3)$$

2.5 Relatif büyüme hızı (RGR)

Lemna türünün deney süresince başlangıçtaki biyokütlesine oranla biyokütlesindeki değişimi, ifade etmek için relatif büyüme hızı (RGR (g⁻¹)) değeri kullanılmıştır. Bu değer, özellikle kısa süreli büyüme değerlendirmelerinde, türlerin çevresel stres koşullarına yanıtlarını analiz etmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Negatif RGR değerleri, bitkinin metabolik aktivitesinin baskılandığını ve biyokütle artışı yerine azalma yaşandığını gösterir.

RGR değeri aşağıdaki (4) numaralı formül ile hesaplanmıştır [26]:

$$RGR = (\ln FW_f - \ln FW_i) / \Delta T \quad (4)$$

Burada:

FW_f: Deney sonunda ölçülen taze ağırlık (g),

DW_i: Deney başında ölçülen taze ağırlık (g),

ΔT: Deney süresi (gün) olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışma özelinde, farklı bor konsantrasyonlarına maruz kalan *Lemna minor* bitkilerinin RGR değerleri hesaplanarak, borun bitki büyümesi üzerindeki baskılayıcı veya uyum sağlanabilir etkileri değerlendirilmiştir.

2.6 Klorofil miktarı tayini

Bitki fizyolojisinin değerlendirilmesi ve fotosentetik performansın izlenmesi amacıyla *Lemna minor* örneklerinde klorofil a, b ve toplam klorofil miktarı belirlenmiştir. Her örnek için 0,1 g taze bitki örneği alınmış

ve %95 (v/v) etanol ile 10 mL hacimde karıştırılmıştır. Ekstraksiyon işlemi karanlık koşullarda oda sıcaklığında 72 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Ekstraksiyonun tamamlanmasının ardından karışım 2790xg'de 10 dakika süreyle santrifüjlenmiş, ardından üstte kalan süpernatant kısmın absorbansı 663 nm ve 645 nm dalga boylarında UV-Vis spektrofotometre kullanılarak ölçülmüştür.

Klorofil konsantrasyonları aşağıdaki (5), (6) ve (7) numaralı formüller kullanılarak hesaplanmıştır [17]:

$$K_a = 12,72_{A663} - 2,69_{A645} \quad (5)$$

$$K_b = 22,90_{A645} - 4,68_{A663} \quad (6)$$

$$K_{top} = K_a + K_b \quad (7)$$

Burada:

Ka: Klorofil a miktarı (mg/g FW),

Kb: Klorofil b miktarı (mg/g FW),

Ktop: Toplam klorofil miktarı (mg/g FW),

A663 ve A645: Sırasıyla 663 nm ve 645 nm'de ölçülen absorbans değerleridir.

Elde edilen klorofil konsantrasyonları, bitkilerin bor stresine karşı fizyolojik tepkilerini değerlendirmek ve toksisite sınırlarını belirlemek amacıyla analiz edilerek değerlendirilmiştir.

2.7 İstatistiksel analiz

Elde edilen tüm veriler ortalama $\pm$ standart sapma (SD) olarak ifade edilmiştir (n=3). Farklı bor konsantrasyonlarının bitki büyümesi (RGR), klorofil içeriği ve bor birikim kapasitesi üzerindeki etkilerinin istatistiksel önemini belirlemek amacıyla SPSS paket programı kullanılarak Tek Yönlü Varyans Analizi (One-Way ANOVA) uygulanmıştır. Gruplar arasındaki farklılıkların belirlenmesinde Tukey HSD çoklu karşılaştırma testi kullanılmış ve $p < 0.05$ değeri istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 *Lemna minor* türünün çok yüksek bor konsantrasyonlarına karşı büyüme tepkisi

Lemna minor bitkisinin 7 gün boyunca yüksek bor konsantrasyonlarında (300-3000 ppm) büyüme performansı değerlendirilmiştir. Bitkisel gelişim, RGR (gün^{-1}) ile analiz edilmiştir. Kontrol grubunda çeşme suyu kullanılmış ilave besi yeri eklenmemiştir; bu nedenle kontrol grubunda RGR -0,11 olarak kaydedilmiştir. Deney gruplarında ise bitkiler Hoagland besin çözeltisi ile desteklenmelerine rağmen, tüm bor konsantrasyonları için kontrol grubundan daha düşük büyüme oranları elde edilmiştir. Besin takviyesine rağmen RGR değerlerinin -0,21 ile -0,26 arasına gerilemesi, ortamdaki besin farkından bağımsız olarak, yüksek bor konsantrasyonunun bitki metabolizması üzerindeki baskılayıcı etkisinin besin eksikliği stresinden çok daha şiddetli olduğunu göstermektedir. **Tablo 1**'de gösterildiği üzere, artan bor konsantrasyonu bitkinin büyüme oranlarında belirgin bir azalmaya yol açmıştır. 300 ppm'den itibaren yüksek bor konsantrasyonlarında bu oran ortalama -0,23 gün^{-1} 'e düşmüştür.

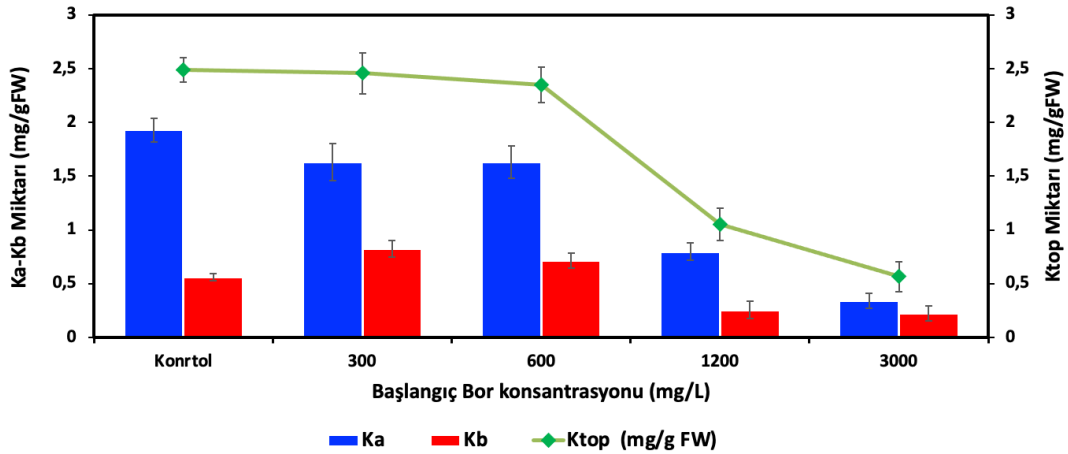
Tablo 1. Farklı bor konsantrasyonunda elde edilen RGR değerleri

Bor Konsantrasyonu (ppm)	RGR
Kontrol	-0,11 $\pm$ 0,01
300	-0,26 $\pm$ 0,03
600	-0,21 $\pm$ 0,02
1200	-0,22 $\pm$ 0,02
3000	-0,23 $\pm$ 0,03

Deneyde *Lemna* bitkilerinin başlangıç ve son taze ağırlıkları kullanılarak hesaplanan büyüme oranları, artan bor konsantrasyonlarıyla birlikte belirgin şekilde azalmıştır. Bu durum borun toksik etkilerinin hücre bölünmesi gibi temel metabolik süreçleri baskıladığını ortaya koyar. Sonuç olarak yüksek bor konsantrasyonlarının *Lemna* üzerinde toksik etki gösterdiğini, ancak buna rağmen bitkisel dokunun tamamen yok olmadığını ve boru absorbe etmeye devam ettiğini göstermektedir. [15] yürüttükleri 7 günlük çalışmada *L. gibba* bitkisinde 25 mg L^{-1} B seviyelerinde büyüme oranlarının ciddi şekilde düştüğünü raporlamışlardır. [9] ise *L. gibba* ile yapılan 10 mg L^{-1} kademeli bor düzeylerinin bitki büyümesini engellemediğini belirtmiş, ancak BCF değeri konsantrasyon arttıkça azalmıştır. Bu bulgular, yüksek dozlarda büyüme inhibisyonu ile metabolik stres gösteren bu çalışmanın sonuçlarıyla uyum içindedir. Mevcut çalışmada gözlemlenen büyüme düşüşü, yüksek bor konsantrasyonunun iyon homeostazını bozduğunu, hücre bölünmesini sekteye uğrattığını göstermektedir. Bu durum, *Lemna* cinsinde önceki çalışmalarda bildirilen fizyolojik stresle paralel bir sonuçtur.

3.2 Klorofil içerikleri üzerinden fizyolojik etki değerlendirmesi

Klorofil analizleri, yüksek bor konsantrasyonlarının bitki üzerindeki fizyolojik etkisini değerlendirmek için kullanılmıştır. *Lemna* örneklerinden elde edilen klorofil a (Ka), klorofil b (Kb) ve toplam klorofil (Ktop = Ka + Kb) içerikleri farklı bor konsantrasyonlarında (300–3000 ppm) ölçülmüştür. Veriler 7. gün sonunda elde edilen taze ağırlık (mg/g FW) üzerinden hesaplanmıştır. Farklı bor konsantrasyonlarının fotosentetik pigmentler üzerindeki etkisi Şekil 2'de gösterilmiştir. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre, maruziyet dozuna bağlı olarak klorofil fraksiyonlarında anlamlı farklılıklar ortaya koyulmuştur ($p < 0.05$). Bor konsantrasyonu arttıkça Ka, Kb ve Ktot değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Ka seviyeleri doza bağlı bir düşüş sergilemiş; 300–600 ppm'de hafifçe azalırken, 1200 ppm ($0,8 \text{ mg/g FW}$) ve 3000 ppm ($0,34 \text{ mg/g FW}$) seviyelerinde kontrol grubuna ($1,93 \text{ mg/g FW}$) kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir azalma göstermiştir. Bunun aksine, Kb iki fazlı bir tepki göstermiştir. Kontrol grubuna ($0,56 \text{ mg/g FW}$) kıyasla 300 ppm'de ($0,82 \text{ mg/g FW}$) anlamlı bir artış gözlenmiş, Ancak, ≥ 1200 ppm konsantrasyonlarda Kb içeriği keskin bir şekilde düşmüştür. Kontrol grubunda Ktot değeri $2,49 \text{ mg/g FW}$ iken, 3000 ppm bor konsantrasyonunda bu değer $0,56 \text{ mg/g FW}$ 'ye kadar düşmüştür. Bu durum, yüksek bor içeriğinin klorofil sentezini ve/veya stabilitesini baskılayarak fotosentez verimini düşürüp, yaprak dokularının bütünlüğüne zarar verdiğini desteklemektedir.



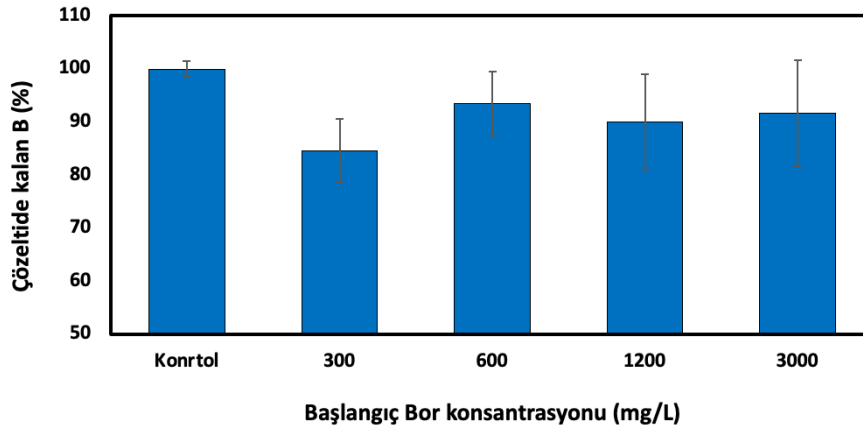
Şekil 2. Farklı bor konsantrasyonlarında klorofil değerlerindeki (Ka, Kb, Ktop) değişim

Villavicencio vd. (2007) *Lemna gibba* üzerinde yaptığı çalışmada, 2 mg/L bor uygulaması sonrası toplam klorofil içeriğinde değişim gözlemlenmemiştir [27]. Ayrıca, 2 mg/L bor konsantrasyonunda *Lemna minor* L.'nin 100 mM üzerindeki tuz stresi koşullarında toplam klorofil miktarının düştüğü rapor edilmiştir [17]. Del-Campo Marín ve Oron (2007) çalışmasında, 10 ppm 'e kadar bor dozlarında bile *L. gibba*'nın pigment seviyelerinde düşüş gözlemlenmiştir [9]. Bunun yanında, Kayıhan vd. (2016) tarafından 1 mM B ve 3 mM B ile yapılan çalışmada Ka ve Kb seviyelerinin 1 mM 'dan itibaren hızla düştüğü gösterilmiştir [28]. Hatta 3 mM seviyesinde Kb değerindeki düşüş sekiz kata çıkmıştır. Yüksek bor konsantrasyonlarında Ktop oranında azalma ve Ka/Kb oranında bozulma görüldüğünü literatürde raporlamıştır [29].

Bu çalışmanın sonuçlarına göre da Ka ve Kb düzeyindeki azalma dramatik olmuştur, bu da fotosentetik pigment dengesinde bozulmaya işaret etmektedir. 3000 ppm’de toplam klorofil miktarı yalnızca 0,56 mg/g FW düzeyinde olup, *Lemna minor*’un yüksek bor seviyelerine fizyolojik fonksiyonlarının zarar gördüğünü göstermektedir. Ancak bu çalışmanın temel amacı **bitki sağlığını incelemek değil, bitki ölümü gözlenirse de yüksek bor yüklerini kısa sürede uzaklaştırma kapasitesini değerlendirmek** olduğundan, klorofil azalması kritik bir kısıtlama olarak değil, sistemin işlevselliği adına dikkate alınması gereken bir yan etkidir.

3.3 Farklı konsantrasyonlardaki bor giderimi

Farklı başlangıç bor konsantrasyonlarına sahip deney gruplarında, 1., 2., 4. ve 7. günlerde çözelti içerisinde kalan ortalama bor miktarlarının başlangıç miktarına göre yüzde değişim oranları **Şekil 3**’te sunulmuştur. Grafikte görüldüğü üzere, görece düşük başlangıç konsantrasyonlarında (300 ppm) çözeltideki bor konsantrasyonu %15 düşmüş, bu durum belirtilen konsantrasyonlarda bile *Lemna minor*’un biriktirme kapasitesine işaret etmektedir. Daha yüksek başlangıç konsantrasyonlarda ise, bor konsantrasyonundaki değişim dalgalı bir seyir göstermekle birlikte % 6,5-10 arasında düşüş göstermiştir. Bu, başlangıçtaki yüksek yük nedeniyle sistemin boru tam olarak uzaklaştıramadığını, ancak yine de anlamlı miktarda bor uzaklaştırıldığını ortaya koymaktadır. Bu bulgu, çözeltiden oransal giderim (%6,5-15) sınırlı kalmış olsa da bitki dokusundaki bor konsantrasyonunun artışı, *Lemna*’nın yüksek konsantrasyonlarda bor gideriminin sınırlı olduğunu, ancak aşırı yüklü ortamlarda bile bor biriktirebildiğini göstermesi açısından önemlidir, dolayısıyla acil müdahale veya kaza durumlarında etkili bir fitoremediasyon ajanı olarak kullanılabileceğini desteklemektedir.



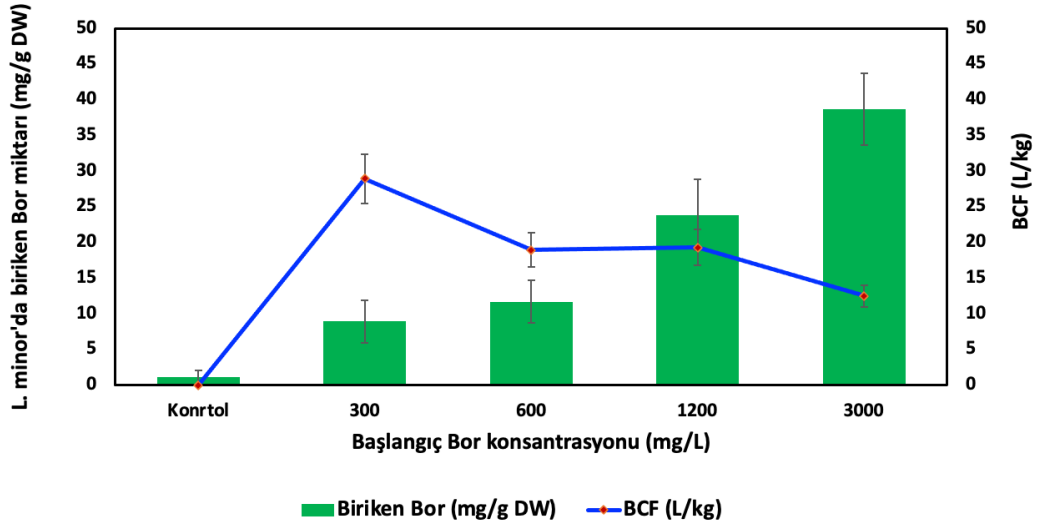
Şekil 3. Farklı konsantrasyonlarda çözelti içerisinde kalan ortalama bor miktarlarının başlangıç miktarına göre yüzde değişim oranları

Ökten ve Gören (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, *Lemna minor*, 5 mg L⁻¹ bor konsantrasyonunda %96,7 giderim sağlarken, konsantrasyon 30 ppm’e yükseldiğinde giderim %36,6’ya düşmüş ve bitki metabolizmasında renk ve yapı bozulmaları kaydedilmiştir [18]. Türker vd. (2017) ise ortalama 5,6-17,4mg L⁻¹ giriş B konsantrasyonlarında *L. gibba*’nın %19–63 bor giderimi raporlamışlardır [5]. Diğer bir çalışmada Türker vd. (2019) *Lemna gibba* kullanarak 4 ppm B konsantrasyonunda %71 oranında B giderimi sağlandığını belirtmişlerdir [30]. Literatürdeki çalışmalarda artan konsantrasyona bağlı verim düşüşü, mevcut çalışma ile uyumludur.

3.4 *Lemna minor*’da bor birikimi ve BCF değerleri

Lemna minor bitkisinde farklı başlangıç bor konsantrasyonlarına maruz bırakılan örneklerde birikmiş bor miktarı (mg/g DW) ve buna karşılık hesaplanan biyokonstantrasyon faktörü (BCF; L/kg) **Şekil 4**’te gösterilmektedir. Veriler, 7. gün sonunda alınan örneklerle dayanmaktadır. BCF değeri, her bir deney koşulunda bitkide biriken bor miktarının ortam başlangıç konsantrasyonuna oranı ile hesaplanmıştır. *Lemna minor* dokusunda biriken bor miktarı artan çözelti bor konsantrasyonuna bağlı olarak anlamlı şekilde artmıştır. Kontrol, 300,600, 1200, 3000 ppm çözeltilerinde bitkideki bor birikimi 1,1; 8,9; 11,7; 23,9; 38,7 mg/g DW olarak ölçülmüştür. Şekil

4'te görüldüğü üzere, bor konsantrasyonu arttıkça *L. minor* örneklerinde biriken bor miktarı da artış göstermiş, 3000 ppm'lik ekstrem seviyede yaklaşık 39 mg/g DW gibi yüksek bir birikim değeri gözlemlenmiştir. Bu değer, literatürde bildirilen birçok çalışmadan belirgin biçimde yüksektir. Örneğin, literatürde 0,3–5 mg/L arası bor konsantrasyonlarında maksimum 930-1900 mg kg⁻¹ DW düzeyinde birikim raporlanmıştır [9]. Bunun yanında farklı çalışmaları *L. minor* ve *L. Gibba* bitkilerinde maksimum bor birikimini 4007 mg/kg ve 5091 mg/kg olarak bulmuşlardır [16]. Literatürde *Lemna* türlerindeki bor birikimi başlangıç bor konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak artış göstermiştir. Bu durum mevcut çalışma ile uyum göstermektedir. Bu bulgu, bitkinin kısa süreli, aşırı yüklenmeye sahip sistemlerde etkili bir bor alıcısı olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4. *Lemna minor*'deki bor birikimi ve BCF değerlerinin başlangıç bor konsantrasyonuna göre değişimi

Öte yandan, deney sonuçlarına göre BCF, artan bor konsantrasyonları ile azalan bir eğilim sergilemiştir. BCF değerleri, bor alım verimliliğini göstermesi açısından önem taşır. BCF değeri 1 üzerindeyse, hiperakümülayon potansiyeli değerlendirilir. En yüksek BCF değeri en düşük maruziyet dozunda (300 ppm) 28,9 L/kg olarak hesaplanmıştır. Bu durum, *L. minor*'un düşük ortam konsantrasyonlarında boru etkili şekilde absorbe ettiğini ve biyokütlesinde yoğunlaştırdığını göstermektedir. Maruziyet konsantrasyonu 600, 1200 ve 3000 ppm'e çıktığında, BCF değerleri sırasıyla 18,9; 19,3 ve 12,5 L/kg seviyelerine gerilemiştir. Bu sonuçlar, yüksek bor seviyelerinin toksik etkileri nedeniyle borun bitki tarafından efektif alınmasının sınırlandığını göstermektedir.

Bor toksisitesinin bitkilerdeki temel mekanizmaları önceki çalışmalarda bildirilmiştir. Düşük bor konsantrasyonlarında, bor alımı bitkilerde özel bir protein aracılığıyla gerçekleşirken, buna karşılık, yüksek konsantrasyonlarda plazma zarı aracılığıyla pasif difüzyon ile meydana gelir. Bor konsantrasyonundaki artışla birlikte bitkide bor birikimi de artar. Yüksek bor konsantrasyonları, büyüme inhibisyonu, kloroz ve nekroz gibi zararlı etkilere yol açabilir [20]. Aşırı bor kirliliğinin *Lemna minor* gibi sucul bitkilerde hücre zarı bütünlüğünün bozulmasına ve zar geçirgenliğinin artmasına yol açtığı görülmüştür. Örneğin, Liu ve diğ. (2018), tuz stresi uygulanan *L. minor*'un NaCl konsantrasyonlarının artmasıyla hücre zarı bütünlüğünde bozulma yaşadığını ve zar geçirgenliğinin yükseldiğini raporlamışlardır. Bu artan geçirgenlik, hücre zarından pasif difüzyon yoluyla borun daha kolay alınmasına imkan tanır [17].

Mevcut çalışma, *L. minor*'un özellikle yüksek dozlarda (300–3000 ppm) dahi bor birikimi yapabileceğini göstermesiyle literatürdeki düşük doz çalışmalardan ayrılmaktadır. Bu veriler ışığında, *L. minor*'un toksisiteye bağlı zar bütünlüğünde bozunma meydana gelmesi ve geçirgenliğin artması olasıdır.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bitki sağlığının öncelenmediği acil fitoremediasyon durumunda yüksek bor konsantrasyonlarının giderimi için *Lemna minor*'ün kullanımı araştırılmıştır. Literatürde *Lemna minor* gibi sucul bitkilerde düşük konsantrasyonlarda başarılı fitoremediasyon örnekleri mevcuttur. Ancak bu çalışma, çok daha yüksek konsantrasyonlarda (300–3000 mg/L) acil müdahale senaryolarını hedeflemektedir.

Deney sonuçlarına göre *Lemna minor* dokusunda biriken bor miktarı artan çözelti bor konsantrasyonuna bağlı olarak anlamlı şekilde artmış, 3000 ppm bor çözeltisinde 38,7 mg/g DW'a ulaşmıştır. En yüksek BCF (L/kg) değerine ise 300 ppm konsantrasyon grubunda 28,9 L/kg olarak ulaşılmıştır. Toplam klorofil değeri 0,56 mg/g FW düzeyine kadar düşüş göstermiş, Kb değeri 3000 ppm çözeltide 0,23 mg/g FW seviyesine kadar düşmüştür.

Sonuçlara göre bor toksisitesi görece düşük ppm seviyelerinde belirgin şekilde gözlemlenmiştir. *Lemna minor*'de bor birikimi yüksek olsa da biyokütledeki düşüş ve klorofil miktarındaki azalma büyümeyi baskılamış ancak henüz geri dönüşümsüz toksik etki görülmemiştir. Çok yüksek ppm'de bor maruziyeti ise, *Lemna* türü üzerinde yüksek toksik etki yaratmıştır. Fotosentetik kapasite belirgin biçimde bozulmuş. Klorofil kaybı ve anormal absorpsiyon değerleri bitki sağlığının ciddi düzeyde bozulmuştur.

Bu sonuçlar, *Lemna* türlerinin bor birikimine karşı yüksek kapasiteye sahip olduğunu, ancak belirli eşik düzeylerinden sonra hem büyüme hem de fizyolojik fonksiyonların bozulduğunu göstermektedir. Ancak bu çalışmanın temel amacı **bitki sağlığını öncelemek değil, bitki ölümü gözlemlense de yüksek bor yüklerini kısa sürede uzaklaştırma kapasitesini değerlendirmek** olduğundan, bor birikimi ve BCF değerleri göz önüne alındığında, *Lemna minor*'un bor gideriminde potansiyel **acil fitoremediasyon ajanı** olarak kullanımının olası olduğunu düşünülmektedir.

Yürütülen çalışma kesikli sistemde gerçekleştirildiğinden bir ön değerlendirme niteliğinde olduğu unutulmamalıdır. Elde edilen veriler, *Lemna minor*'un ekstrem bor yüklerine kullanımını kanıtlasa da yöntemin tam ölçekli uygulanabilirliği için hidrolik bekletme süresi ve sürekli akış koşullarının optimize edildiği reaktör çalışmalarına ihtiyaç vardır.

Yazarlık Katkı Beyanı

B.Y.G: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma, Görselleştirme.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarın bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edeceği hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Yazar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan eder.

Kaynaklar

- [1] Duman MV, Özmetin E. Boron removal from waste water originating in the open pit mines of Bigadiç Boron Work by means of reverse osmosis. *International Journal of Global Warming* 2014; 6: 252-269.
- [2] Isa MH, Ezechi EH, Ahmed Z, Magram SF ve Kutty SRM. Boron removal by electrocoagulation and recovery. *Water Research* 2014; 51: 113-123.
- [3] Yuce G, Yasin D. Assessment of an Increase in Boron and Arsenic Concentrations at the Discharge Area of Na-Borate Mine (Kırka-Eskisehir, Turkey). *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 2012; 23: 703-723.
- [4] Zhao S, Huq ME, Fahad S, Kamran M, ve Riaz M. Boron toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies; a review. *Plant Cell Rep* 2024; 43: 238.
- [5] Türker OC, Yakar A ve Gür N. Bioaccumulation and toxicity assessment of irrigation water contaminated with boron (B) using duckweed (*Lemna gibba* L.) in a batch reactor system. *Journal of Hazardous Materials* 2017; 324: 151-159.
- [6] Kuru R, Yılmaz S, Sacan O, Yanardag R, Yarat A, ve Sahin F. Boron concentrations in tap water in many cities of Turkey. *Toxicological & Environmental Chemistry* 2020; 102: 240-249.
- [7] World Health Organization, Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum, 4th ed., 1st add. Geneva: World Health Organization, 2017.
- [8] Mutlu-Salmanli O, Koyuncu I. Boron removal and recovery from water and wastewater. *Rev Environ Sci Biotechnol* 2022; 21(3): 635-664.
- [9] Del-Campo Marín CM, Oron G. Boron removal by the duckweed *Lemna gibba*: A potential method for the remediation of boron-polluted waters. *Water Research* 2007; 41: 4579-4584.
- [10] Mutlu-Salmanli O, Kazak A, Turken T, Pasaoglu ME, Zeytuncu B, Koyuncu I. Boron removal and recovery via vacuum assisted air gap membrane distillation-crystallization (VAGMD-C): A pilot-scale study. *Desalination* 2023; 547: 116229.
- [11] Zeytuncu B, Pasaoglu ME, Eryildiz B, Kazak A, Yuksekdağ A, Korkut S, Kaya R, Turken T ve diğerleri. Application of different treatment systems for boron removal from industrial wastewater with extremely high boron content. *Journal of Water Process Engineering* 2023; 55: 104083.
- [12] Yan A, Wang Y, Tan SN, Mohd Yusof ML, Ghosh S, Chen Z. Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Front. Plant Sci* 2020; 11: 513099.
- [13] Sree K, Bog M, Appenroth K. Taxonomy of duckweeds (Lemnaceae), potential new crop plants. *Emir. J. Food Agric* 2016; 28(5): 291.
- [14] Rai PK. Heavy Metal Pollution in Aquatic Ecosystems and its Phytoremediation using Wetland Plants: An ecosustainable approach. *International Journal of Phytoremediation* 2008; 10(2): 133-160.

- [15] Böcük H, Yakar A, ve Türker OC. Assessment of *Lemna gibba* L. (duckweed) as a potential ecological indicator for contaminated aquatic ecosystem by boron mine effluent. *Ecological Indicators* 2013; 29: 538-548.
- [16] Gür N, Türker OC, ve Böcük H. 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* 2016; 157: 1-9.
- [17] Liu C, Gu W, Dai Z, Li J, Jiang H, Zhang Q. Boron accumulation by *Lemna minor* L. under salt stress. *Sci Rep* 2018; 8(1): 954.
- [18] Ökten HE, Gören AY. Phytoremediation of Boron using *Lemna minor* from Synthetic Aqueous Solutions and Real Geothermal Water. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2021; 25(2): 217-228.
- [19] Tatar ŞY, Öbek E. Potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. for accumulation of Boron from secondary effluents. *Ecological Engineering* 2014; 70: 332-336.
- [20] Cui R, Kwak JI, An YJ. Understanding boron toxicity in aquatic plants (*Salvinia natans* and *Lemna minor*) in the presence and absence of EDTA. *Aquatic Toxicology* 2024; 269: 106886.
- [21] Zhao Q, Li J, Dai Z, Ma C, Sun H, Liu C. Boron tolerance and accumulation potential of four salt-tolerant plant species. *Sci Rep* 2019; 9(1): 6260.
- [22] Stiles AR, Bautista D, Atalay E, Babaoğlu M, Terry N. 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*. *Environ. Sci. Technol* 2010, 44(18): 7089-7095.
- [23] Sitarska M, Traczewska T, Filarowska W, Hołtra A, Zamorska-Wojdyla D, Hanus-Lorenz B. Phytoremediation of mercury from water by monocultures and mixed cultures pleustophytes. *Journal of Water Process Engineering* 2023; 52: 103529.
- [24] Daud MK, Ali S, Abbas Z, Zaheer IE, Riaz MA, Malik A, Hussain A, Rizwan M, Zia-ur-Rehman M, Zhu SJ. Potential of Duckweed (*Lemna minor*) for the Phytoremediation of Landfill Leachate. *Journal of Chemistry* 2018; 2018(1): 3951540.
- [25] Chaudhary E, ve Sharma P. Chromium and cadmium removal from wastewater using duckweed - *Lemna gibba* L. and ultrastructural deformation due to metal toxicity. *International Journal of Phytoremediation* 2019; 21(3): 279-286.
- [26] O'Mahoney R, Coughlan NE, Walsh É, Jansen MAK. Cultivation of *Lemna Minor* on Industry-Derived, Anaerobically Digested, Dairy Processing Wastewater. *Plants* 2022; 11(22): 3027.
- [27] Villavicencio MS, Silva CĂ, Arce GM. Boron toxicity in *Lemna gibba*. *Hidrobiologica* 2007; 17: 1-6.
- [28] Kayihan DS, Kayihan C, Çiftçi YÖ. Excess boron responsive regulations of antioxidative mechanism at physio-biochemical and molecular levels in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology and Biochemistry* 2016; 109: 337-345.
- [29] Dağlioğlu Y, Türkiş S. A Comparative Study on the Effect of Acute Toxicity of Nano and Micro Boron Particles in *Lemna minor* (Linnaeus 1753)", *Journal of Boron* 2021; 6(2): 263-273.
- [30] Türker OC, Yakar A, Türe C, Saz Ç. Boron (B) removal and bioelectricity captured from irrigation water using engineered duckweed-microbial fuel cell: effect of plant species and vegetation structure. *Environ Sci Pollut Res Int* 2019; 26(30): 31522-31536.