



Kadmiyum, Krom ve Kurşunun *Ceratophyllum demersum* L. ve *Pogostemon erectus* (Dalzell) Kuntze Üzerine Fitotoksitesinin Değerlendirilmesi

Assessment of Phytotoxicity of Cadmium, Chromium and Lead on Ceratophyllum demersum L. and Pogostemon erectus (Dalzell) Kuntze

Muhammet Doğan^{1*}, Mehmet Karataş², Muhammad Aasim²

¹Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Kamil Özdağ Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Yunus Emre Kampüsü, Karaman, Türkiye

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Konya, Türkiye

Öz

Sanayi faaliyetleri, birçok ağır metalin su ortamına karışmasına neden olmaktadır. Ağır metaller bitkiler üzerinde ciddi toksik etkiler gösterirler. Bu çalışmada, kadmiyum (Cd), krom (Cr) ve kurşun (Pb) metallerinin *Ceratophyllum demersum* L. ve *Pogostemon erectus* (Dalzell) Kuntze üzerine morfolojik etkileri ve medyan etkili konsantrasyon (EC50) değerleri araştırılmıştır. 5 gün sonunda elde edilen veriler istatistiksel olarak Probit Analizi ile değerlendirilmiştir. *C. demersum*'da EC50 değerleri Cd için 1.403 mg/L (1.018-1.864), Cr için 8.473 mg/L (6.198 - 11.667) ve Pb için 78.349 mg/L (49.622-112.981) olarak tespit edilmiştir. *P. erectus*'da EC50 değerleri Cd için 0.879 mg/L (0.590 - 1.252), Cr için 1.120 mg/L (0.729 - 1.646) ve Pb için 1.727 mg/L (1.144 - 2.653) olarak bulunmuştur. EC50 değerleri bakımından *C. demersum* ve *P. erectus* için en toksik ağır metaller Cd > Cr > Pb olarak kaydedilmiştir. Ağır metallerin yüksek seviyelerde uygulanması bitki üzerindeki toksik etkiyi artırmıştır. Genel olarak, metal toksisitesi altındaki bitkilerde kloroz, yaprak dökülmesi, yumuşama ve ölümler gözlenmiştir. Bu çalışma, bu bitkiler ile yapılacak olan fitoremediasyon çalışmalarına önemli katkılar sunabilir.

Anahtar Kelimeler: Ağır metal, EC50, Kloroz, Toksikite

Abstract

Industrial activities cause many heavy metals to mix in the water environment. The heavy metals have serious toxic effects on plants. In this study, the morphological effects and the median effective concentration (EC50) values of cadmium (Cd), chromium (Cr) and lead (Pb) metals on *Ceratophyllum demersum* L. and *Pogostemon erectus* (Dalzell) Kuntze were investigated. The data obtained at the end of 5 days were evaluated statistically by Probit Analysis. The EC50 values for *C. demersum* were determined to be 1.403 mg/L (1.018-1.864) for Cd, 8.473 mg/L (6.198 - 11.667) for Cr and 78.349 mg/L (49.622-112.981) for Pb. The EC50 values of *P. erectus* were found to be 0.879 mg/L (0.590 - 1.252) for Cd, 1.120 mg/L for Cr (0.729 - 1.646) and 1.727 mg/L (1.144 - 2.653) for Pb. In terms of EC50 values, the most toxic heavy metals for *C. demersum* and *P. erectus* were recorded as Cd > Cr > Pb. The toxic effects of heavy metals on plants were increased at high-level metal applications. In general, chlorosis, leaf loss, softening and deaths were observed in the plants under metal toxicity. This study can provide significant contributions to the phytoremediation studies that will be done with these plants.

Keywords: Heavy metal, EC50, Chlorosis, Toxicity

1. Giriş

Evsel ve sanayi atıksularının neden olduğu çevre kirliliği, birçok ülkede giderek artan bir sorun haline gelmiştir. Bu

atıksular oldukça fazla miktarda kirlilik içerdikleri için sadece kimyasal yöntemler kullanılarak suların kalitesi hakkında yeterli bilgi sağlamak zordur. Bu nedenle canlı hücreler veya organizmalar ile biyolojik test sistemlerinin kullanılması esastır. Doğal su ortamlarında bulunan bitkiler, sürekli olarak kirliliğe maruz kalırlar. Ayrıca bitkiler neredeyse tüm yüksek ökaryotların başlıca enerji kaynağıdır ve kirlleticilerin yüksek trofik seviyelere taşınmasında aktif bir rol oynarlar (Radić vd. 2010).

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: mtdogan1@gmail.com

Muhammet Dogan orcid.org/0000-0003-3138-5903
 Mehmet Karatas orcid.org/0000-0003-1507-2931
 Muhammad Aasim orcid.org/0000-0002-8524-9029

Kirleticiler arasında yer alan ağır metaller parçalanamadıkları ve canlı dokularda birikme eğiliminde olduklarından dolayı insan, bitki ve çevre sağlığı için ciddi sorunlar oluştururlar (Lesmana vd. 2009). Kadmiyum (Cd) toksisitesi bitkilerde büyümenin yavaşlaması, kloroz, kök uçlarının kahverengileşme ve ölüm gibi ciddi zararlara neden olmaktadır. Bitki için önemli besin elementlerinin alınmasına, besinlerin kökten sürgün uçlarına taşınmasına ve klorofil biyosentezini durdurarak fotosenteze engel olabilmektedir (Benavides vd. 2005, Nagajyoti vd. 2010).

Krom (Cr) toksisitesi bitkilerde fotosentez, mineral alımı ve solunum gibi önemli metabolik ve fizyolojik olayları etkileyerek bitkinin büyüme ve gelişimi engeller. Tohumların çimlenme sürecini değiştirir veya tohum çimlenmesini durdurur. Kök, gövde ve yaprak büyümesini etkileyerek toplam kuru madde üretimini azaltır. Ayrıca, bitkilerdeki enzimleri doğrudan etkileyerek, reaktif oksijen türleri ile oksidatif strese neden olabilmektedir (Shanker vd. 2005, Yıldız vd. 2011).

Kurşun (Pb) bitkilerde kök sisteminin gelişimine zarar vermekte, bitkinin bodur kalmasına ve kloroza sebep olmaktadır. Kurşunun çok düşük oranda bitkiye girmesi bile büyük fizyolojik değişimlere neden olabilmektedir. Pb toksisitesi enzim aktivitesinin engellenmesine, hormonal durum bozukluğuna, membran geçirgenliğinde dengesizliğe, dışarıdan mineral alımında azalmaya ve su dengesinin bozulmasına sebebiyet verebildiği vurgulanmıştır. Yüksek Pb etkisi ise bitkinin ölmesine yol açabilmektedir. Pb toksisitesi tohumların çimlenmesini engeller ve fide büyümesini geciktirir. Bitkinin kök ve sürgün kuru ağırlığını, çimlenme indeksini azaltır (Sharma ve Dubey 2005).

Bu çalışmada, yüksek toksisiteye sahip Cd, Cr ve Pb ağır metallerinin akuatik bitkiler olan *Ceratophyllum demersum* L. ve *Pogostemon erectus* (Dalzell) Kuntze üzerindeki morfolojik etkilerinin araştırılması ve 5 günlük medyan etkili konsantrasyon (EC_{50}) değerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Bitki Büyütme Koşulları ve Bitkilerin Deneye Hazırlanması

EC_{50} çalışmalarında kullanılan *C. demersum* ve *P. erectus*, bitki doku kültürü teknikleri ile üretilmiştir. *C. demersum*'ün *in vitro* üretimi için bitkinin sürgün ucu eksplantları 0.40 mg/L benzil amino purin (BAP) içeren sıvı Murashige ve Skoog (MS) temel besin ortamında (Murashige ve Skoog 1962) sekiz hafta süre ile kültüre alınmasıyla elde

edilirken, *P. erectus*'ün *in vitro* üretimi ise bitkinin sürgün ucu eksplantlarının 0.25 mg/L BAP içeren MS besin ortamında sekiz hafta süre ile 2K:1M LED ışık aydınlatma altında kültüre alınmasıyla elde edilmiştir. *In vitro* üretilen bitkilerin dış koşullara adaptasyonu için üzerindeki besin ortamı uzaklaştırılmış ve ardından bitkiler %10'luk Hoagland besin çözeltisi (Hoagland ve Arnon 1950) içeren su bulunan kaplar içerisine yerleştirilerek, iki hafta süre ile iklimlendirme dolabında bekletilmiştir. İklimlendirme kabini, 24°C sıcaklık, %80 bağıl nem ve 16 saat flouresan aydınlatma 8 saat karanlık olacak şekilde ayarlanmıştır.

2.2. Stok Çözeltilerin Hazırlanması

EC_{50} deneylerinde ağır metal olarak Cd için $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (Sigma), Cr için $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (Sigma) ve Pb için $Pb(NO_3)_2$ (Sigma) kimyasalları kullanılmıştır. Çözeltiler hazırlanmadan önce her bir ağır metal uygulaması için 1000 mg/L'lik stok solüsyonlar oluşturulmuş ve diğer derişimler bu stok çözeltiden seyreltilerek hazırlanmıştır. Çözeltilerin hazırlanmasında kimyaca inert ve yeterli büyüklükteki cam materyaller kullanılmıştır. Tüm materyaller kullanılmadan önce %5'lik NaClO ve ardından %10'luk nitrik asit (HNO_3) ile temizlenmiş ve 3 kez ultra saf su ile durulanmıştır. EC_{50} denemelerinde, %10 Hoagland besin çözeltisinden 1000 ml'lik stoklar hazırlanmış ve su ortamlarına litreye %10 ölçüsünde kullanılmıştır.

2.3. Deney Düzenegi

Medyan etkili konsantrasyon (EC_{50}), deney organizmalarının %50'sinde anormallikler, morfolojik bozukluklar (yapraklarda sararma, beyazlama ve ayrılma) gibi etki meydana getiren konsantrasyondur (Üçüncü, 2011). EC_{50} değerlerinin belirlenmesi için her iki bitki türünden yaklaşık 5-6 cm uzunluğunda 20 adet bitki Cd, Cr ve Pb'nin farklı konsantrasyonlarında 5 gün süre ile bekletilmiştir (Çizelge 1). EC_{50} denemeleri 400 ml'lik beherglaslarda ve her bir ağır metal dozu 3 tekrarlı olacak şekilde uygulanmıştır (pH:7). Ayrıca kontrol amaçlı olarak ağır metal içermeyen su ortamına da deney ortamı ile aynı sayıda bitki konulmuştur. Tüm yapılan çalışmalarda ultra saf su kullanılmıştır. Bu denemeler sonucunda bitkilerde meydana gelen renk değişimi, solma, yumuşama ve ölüm gibi morfolojik değişiklikler tespit edilerek, *C. demersum* ve *P. erectus* için EC_{50} değerleri belirlenmiştir. Denemeler, 25°C sıcaklık, %80 bağıl nem, 16 saat aydınlık 8 saat karanlık olacak şekilde ayarlanmış iklimlendirme dolabında gerçekleştirilmiştir.

2.4. İstatistiksel Analizler

Tüm denemeler 3 tekrarlı yapılmıştır. Bu denemelerinden

Çizelge 1. *C. demersum* ve *P. erectus* bitkilerinde Cd, Cr ve Pb için EC₅₀ belirleme çalışmasında uygulanan konsantrasyonlar

<i>C. demersum</i>			<i>P. erectus</i>		
Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Pb (mg/L)
0,01	0,1	1	0,01	0,01	0,01
0,1	0,2	10	0,1	0,1	0,1
0,2	0,5	30	0,5	0,5	0,5
0,5	1	50	1	1	1
1	2	70	2	2	2
2	4	90	4	4	4
4	8	110	8	8	8
8	16	130	16	16	16
16	32	150	32	32	32
32	64	170	64	64	64

elde edilen veriler EC₅₀ değerinin belirlenmesi için EPA Probit Analiz Program (Used For Calculating LC/EC Values) Version 1.5 ile analiz edilmiştir.

3. Bulgular

In vitro koşullarda çoklu üretimi gerçekleştirilen bitkilerin dış koşullara adaptasyonu sağlandıktan sonra EC₅₀ değerlerinin belirlenmesi çalışmaları yürütülmüştür. Bu bağlamda, *C. demersum* ve *P. erectus*'dan yaklaşık 5-6 cm uzunluğunda 20 adet bitki alınarak Cd, Cr ve Pb'nin farklı konsantrasyonlarında 5 gün süre ile maruz bırakılmış ve EC₅₀ değeri EPA probit analiz metodu ile istatistiksel olarak tespit edilmiştir.

3.1. *C. demersum* için EC₅₀ Değeri Belirlenmesi

C. demersum'un EC₅₀ değerinin belirlenmesi için bitkiler, 0.01-32 mg/L Cd, 0.1-64 mg/L Cr ve 1-170 mg/L Pb içeren su ortamlarına 5 gün süre ile aktarılmıştır. Sonuçlar istatistiksel olarak Probit Analizi ile değerlendirilmiştir (Çizelge 2).

Cd, Cr ve Pb uygulaması sonucu elde edilen EC₅₀ değeri sırasıyla 1.403 mg/L (1.018-1.864), 8.473 mg/L (6.198 - 11.667) ve 78.349 mg/L (49.622-112.981) olarak tespit edilmiştir. Her üç ağır metal uygulamaları da *C. demersum* üzerinde olumsuz etki yaptığı ve bitkiyi strese sokarak bitkinin genel görünümünde değişimlere sebep olduğu görülmüştür. Düşük metal konsantrasyonları, bitkilerin yapraklarında kloroza sebep olmuştur. Uygulanan Cd konsantrasyonu arttıkça bitkilerde renk kayıpları, yaprak dökümü ve bitkinin bazı bölgelerinde yumuşamalar tespit edilmiştir (Şekil 1. b ve c). Ortamdaki Cr konsantrasyonunun artması ise bitkilerde renk kayıplarının yanı sıra gövde ve yapraklarda bölgesel kahverengileşmelere sebep olmuştur (Şekil 1 e

ve f). Düşük oranda Pb etkisinde bitkilerde kontrole göre yapraklarda sararmalar, yaprak uçlarında ve yaprakların çıktığı meristematik bölgelerinde kahverengileşmeler tespit edilmiştir. Uygulanan Pb konsantrasyonu arttıkça bitkilerde renk kayıpları ve hatta ölümler olmuştur (Şekil 1 h ve i).

3.2. *P. erectus* için EC₅₀ Değeri Belirlenmesi

P. erectus'un EC₅₀ değerinin hesaplanması için bitkiler farklı konsantrasyonlarda 0.01-64 mg/L Cd, 0.01-64 mg/L Cr ve 0.01-64 mg/L Pb metallerini içeren su ortamında 5 gün süre ile bırakılmış ve sonuçlar Probit Analizi metodu ile değerlendirilmiş ve Çizelge 3'de verilmiştir.

Farklı konsantrasyonlarda ağır metal konsantrasyonların maruz bırakılan bitkilerin EC₅₀ değerleri Cd için 0.879 mg/L (0.590 - 1.252), Cr için 1.120 mg/L (0.729 - 1.646) ve Pb için 1.727 mg/L (1.144 - 2.653) olarak bulunmuştur. Ağır metallerin bitki üzerinde toksik etkileri konsantrasyona bağlı olarak artış göstermiştir. Düşük konsantrasyonda ağır metal içeren ortamdaki bitkilerde kontrole göre yapraklarda kahverengileşmeler ve gövdede sararmalar belirlenmiştir. Uygulanan Cd konsantrasyonu arttıkça bitkilerde renk kayıpları (Şekil 2 b ve c), yaprak dökümü, bitkinin bazı bölgelerinde yumuşamalar ve ölümler görülmüştür. Yüksek konsantrasyonlardaki Cr etkisinde bitkilerde özellikle kloroz (Şekil 2 e ve f) gözlenmiştir. Düşük konsantrasyonlarda Pb uygulamasında yaprakların çıktığı meristematik bölgelerde koyu kahverengi ve siyah lekelenmeler tespit edilmiştir (Şekil 2 h ve i). Uygulanan Pb konsantrasyonu arttıkça bitkilerde kloroz, yaprak dökümleri ve hatta ölümler gözlenmiştir.

4. Tartışma

Hızlı nüfus artışına paralel olarak artan sanayi faaliyetleri ağır metallerin çevreye yayılmasına neden olmaktadır.

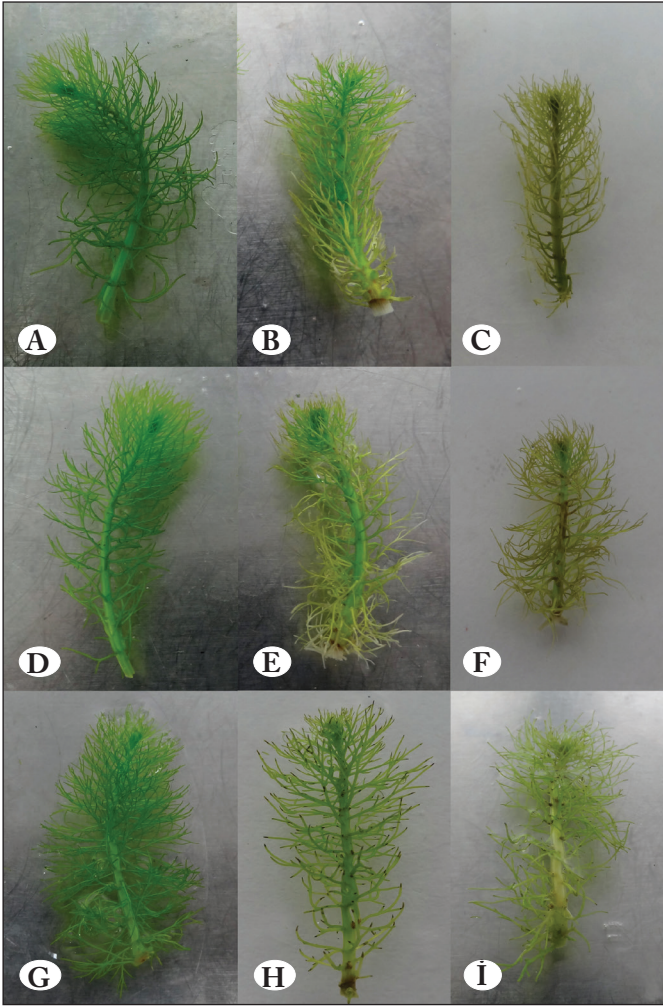
Çizelge 2. Cd, Cr ve Pb uygulanmış *C. demersum*'un EC değerleri.

Nokta	Cd konsantrasyonu (mg/L)	% 95 güven sınırları	
		Alt sınır	Üst sınır
EC ₁	0.155	0.045	0.295
EC ₅	0.296	0.116	0.485
EC ₁₀	0.418	0.193	0.636
EC ₁₅	0.526	0.270	0.767
EC₅₀	1.403	1.018	1.864
EC ₈₅	3.738	2.688	6.468
EC ₉₀	4.713	3.261	9.005
EC ₉₅	6.645	4.300	14.845
EC ₉₉	12.656	7.112	38.509
Nokta	Cr konsantrasyonu (mg/L)	% 95 güven sınırları	
		Alt sınır	Üst sınır
EC ₁	0.749	0.203	1.458
EC ₅	1.525	0.587	2.523
EC ₁₀	2.227	1.026	3.406
EC ₁₅	2.876	1.488	4.193
EC₅₀	8.473	6.198	11.667
EC ₈₅	24.965	16.961	49.414
EC ₉₀	32.236	20.856	71.748
EC ₉₅	47.081	28.121	125.604
EC ₉₉	95.802	48.637	363.621
Nokta	Pb konsantrasyonu (mg/L)	% 95 güven sınırları	
		Alt sınır	Üst sınır
EC ₁	10.040	0.539	22.935
EC ₅	18.327	2.170	34.185
EC ₁₀	25.260	4.531	42.548
EC ₁₅	31.369	7.414	49.555
EC₅₀	78.349	49.622	112.981
EC ₈₅	195.693	130.201	657.064
EC ₉₀	243.013	152.477	1069.130
EC ₉₅	334.953	190.640	2222.805
EC ₉₉	611.441	285.215	8914.292

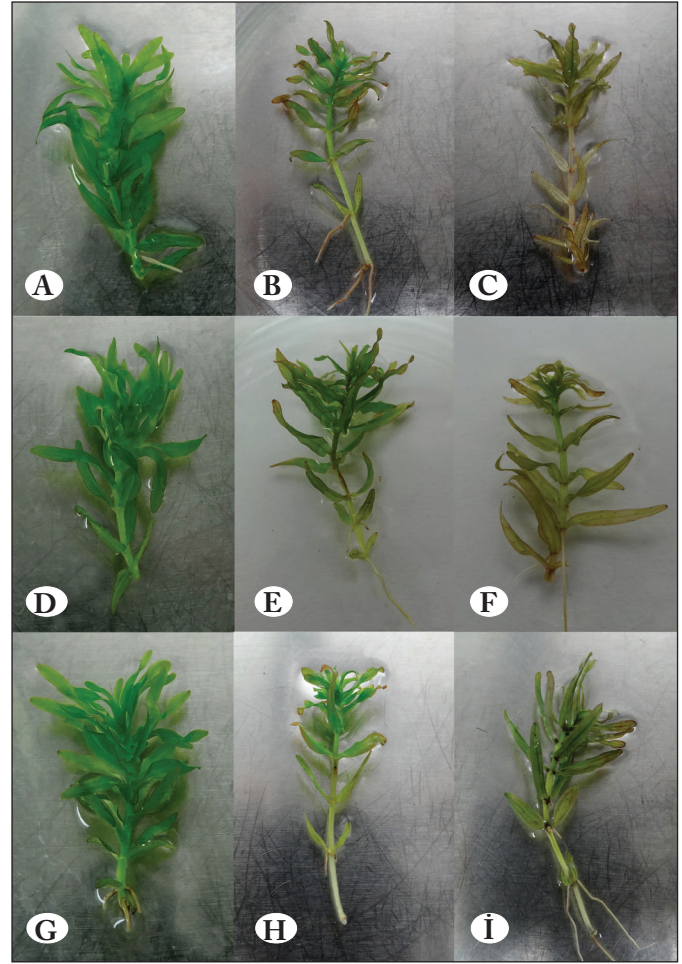
Toksik etkileri yüksek olan ağır metaller olan Cd, Cr ve Pb belirli düzeylerden sonra ortamda yaşayan canlıların metabolik fonksiyonları üzerinde olumsuz yönde etkiler göstermekte ve hatta ölmelerine bile neden olabilmektedir (Baykan 2007).

Bitkilerde en kolay belirlenen fitotoksik etkilerin başında kloroz gelmektedir. Yürüttüğümüz çalışmalarda da Cd, Cr

ve Pb etkisiyle yapraklarda kloroz tespit edilmiştir. Yüksek oranda kullanılan ağır metal ile bitkideki renk kayıpları daha da artış göstermiştir. Bu renk kayıplarının sebepleri arasında; ağır metal etkisi ile birlikte klorofil biyosentezinin bozması, klorofil biyosentezinde görev alan protoklorofil reduktaz ile aminolevulinik asit sentezini engellemesi sayılabilir (Zengin ve Munzuroğlu 2005). Bunların yanı sıra ağır metaller serbest



Şekil 1. Ağır metal uygulamasından etkilenen *C. demersum*; (A, D, G) ağır metal içermeyen ortamdaki bitkiler (kontrol grubu), düşük konsantrasyonlarda (B) Cd, (E) Cr ve (H) Pb uygulanmasından sonra bitkide meydana gelen değişimler, yüksek konsantrasyonlarda (C) Cd, (F) Cr ve (I) Pb uygulanmasından sonra bitkide meydana gelen değişimler.



Şekil 2. Ağır metal uygulamasından etkilenen *P. erectus*; (A, D, G) ağır metal içermeyen ortamdaki bitkiler (kontrol grubu), düşük konsantrasyonlarda (B) Cd, (E) Cr ve (H) Pb uygulanmasından sonra bitkide meydana gelen değişimler, yüksek konsantrasyonlarda (C) Cd, (F) Cr ve (I) Pb uygulanmasından sonra bitkide meydana gelen değişimler.

radikal oluşturarak tilakoid membran lipitlerinin oksidatif yıkımına neden olmakta ve böyle durumlarda ise klorofil yıkımının arttığı ve sentezinin engellendiği bilinmektedir (Öktüren Asri ve Sönmez 2006). Benzer şekilde Koca (2012), *C. demersum*'u farklı sürelerde (1, 2, 4 ve 7 gün) içerisinde farklı konsantrasyonlarda Cr bulunan (1-10 mM) su ortamında bekletmiş ve fotosentetik pigment (klorofil *a*, *b* ve karotenoid) içeriklerinin artan süre ve konsantrasyonun ile önemli oranda azaldığını belirtmiştir. Nath vd. (2005) *Raphanus sativus* L.'u 2-10 mg/L Cr etkisinde 10 ve 20 gün bekletmiş ve uygulanan Cr konsantrasyonu ve süresiyle klorofil *a* ve klorofil *b* içeriğinde azalmayı raporlamışlardır. Ayrıca Cd, Cr ve Pb'nin su bitkileri üzerindeki toksik etkisi

diğer araştırmacılar tarafından da bildirmişlerdir (Aravind ve Prasad 2003, Doğan 2005, Sinha vd. 2005, Mishra vd. 2008, Piotrowska vd. 2009, El-Khatib vd. 2014, Chen vd. 2015, Das vd. 2016).

C. demersum ve *P. erectus* Cd, Cr ve Pb'nin farklı konsantrasyonlarına 5 gün süre ile maruz bırakılmış ve EC₅₀ değeri EPA probit analiz metodu ile istatistiksel olarak tespit edilmiştir. *C. demersum* için EC₅₀ değerleri Cd için 1.403 mg/L (1.018-1,864), Cr için 8.473 mg/L (6.198 - 11.667) ve Pb için 78.349 mg/L (49.622-112.981) olarak bulunmuştur. *P. erectus*'un EC₅₀ değerleri Cd için 0.879 mg/L (0.590 - 1.252), Cr için 1.120 mg/L (0.729 - 1.646)

Çizelge 3. Cd, Cr ve Pb uygulanmış *P. erectus*'un EC değerleri.

Nokta	Cd konsantrasyonu (mg/L)	% 95 güven sınırları	
		Alt sınır	Üst sınır
EC ₁	0.055	0.010	0.125
EC ₅	0.123	0.035	0.232
EC ₁₀	0.190	0.068	0.326
EC ₁₅	0.255	0.105	0.411
EC₅₀	0.879	0.590	1.252
EC ₈₅	3.026	1.986	6.359
EC ₉₀	4.055	2.521	9.802
EC ₉₅	6.255	3.551	18.824
EC ₉₉	14.105	6.626	65.202
Nokta	Cr konsantrasyonu (mg/L)	% 95 güven sınırları	
		Alt sınır	Üst sınır
EC ₁	0.038	0.006	0.098
EC ₅	0.102	0.027	0.210
EC ₁₀	0.174	0.058	0.319
EC ₁₅	0.248	0.096	0.425
EC₅₀	1.120	0.729	1.646
EC ₈₅	5.056	3.156	11.143
EC ₉₀	7.221	4.234	18.473
EC ₉₅	12.247	6.463	39.550
EC ₉₉	32.985	14.002	168.246
Nokta	Pb konsantrasyonu (mg/L)	% 95 güven sınırları	
		Alt sınır	Üst sınır
EC ₁	0.049	0.007	0.128
EC ₅	0.139	0.034	0.285
EC ₁₀	0.242	0.078	0.441
EC ₁₅	0.352	0.137	0.596
EC₅₀	1.727	1.144	2.653
EC ₈₅	8.466	4.887	23.127
EC ₉₀	12.330	6.590	40.365
EC ₉₅	21.525	10.167	92.987
EC ₉₉	61.203	22.576	451.770

ve Pb için 1.727 mg/L (1.144 - 2.653) olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde *C. demersum* ve *P. erectus* için en toksik ağır metaller sırasıyla Cd > Cr > Pb olarak tespit edilmiştir. Ayrıca *C. demersum* için EC₅₀ değerleri tüm metallerde *P. erectus* bitkisinden yüksek bulunmuştur. Bu da *C. demersum* bitkisinin Cd, Cr ve Pb toksisitesi altındaki su ortamında *P. erectus* bitkisinden daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Üçüncü (2011) *L. minor*'u 48 saat süre ile

Cu, Pb ve Cr etkisinde bırakmış ve EC₅₀ değerlerini Cu için 4.359 mg/L, Pb için 0.875 mg/L ve Cr için 10.946 mg/L olarak bulmuştur. Bu sonuçlar, göre Pb'nin, Cu ve Cr'a göre *L. minor* üzerinde daha toksik olduğunu göstermiştir. Oros ve Ana (2012) beş farklı Cd konsantrasyonu (8, 16, 24, 36 ve 40 µM) içeren su ortamında 7 gün boyunca *L. minor*'u bekletmiş ve ardından EC₅₀ değerini test etmişlerdir. 7 gün sonra küçük konsantrasyonda bile kadmiyumun

büyüme inhibisyonu üzerinde yüksek bir etki gösterdiğini ve bitkilerin beyazlaştığını ve öldüğünü bildirmiştir. Sonuçların istatistiksel olarak analiz edilmesi ile hesaplanan EC₅₀ değerinin 0,36 mg/L olduğunu tespit etmiştir. Yapılan bir diğer çalışmada, *Elodea canadensis*'in oksijen üretkenliği bakımından 10 günlük Cu (CuSO₄) toksisitesinin EC₅₀ değeri 0.040 mg/L olarak bildirilmiştir (Sánchez vd. 2007). Khellaf ve Zerdaoui (2009) *L. minor*'un ağır metal kirliliğinin toleransını ve etkisini değerlendirmek için farklı Cu, Ni, Cd ve Zn konsantrasyonlarına maruz bırakmışlardır. EC₅₀ değerlerini; Cu için 0.47 mg/L, Ni için 1.29 mg/L, Cd için 0.64 mg/L ve Zn için 5.64 mg/L olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca bitkinin yapraklarında kloroz ve parçalanmalar olduğunu gözlemlenmişlerdir.

5. Sonuçlar

Sonuç olarak bu çalışmada, 5 gün boyunca farklı konsantrasyonlarda Cd, Cr ve Pb metalleri etkisinde bırakılan *C. demersum* ve *P. erectus*'un metal toksisitesinden kaynaklı morfolojik görüntüleri ve EC₅₀ değerleri tespit edilmiştir. EC₅₀ değerleri bakımından Cd her iki bitki türü içinde en toksik ağır metal olarak saptanırken (*C. demersum* için 1,403 mg/L, *P. erectus* için 0.879 mg/L), Pb en az toksik metal olarak saptanmıştır (*C. demersum* için 78.349 mg/L, *P. erectus* için 1.727 mg/L). Ayrıca, *C. demersum* bu üç ağır metal çeşidi içinde *P. erectus*'a göre daha yüksek toleransa sahip olduğu görülmüştür. Bitkiler için EC₅₀ değerinin belirlenmesi, doğal ortamlarında maruz kaldıkları ağır metal toksisitesinin belirlenmesi ve bu bitkiler ile yapılacak olan arıtım çalışmaları (fitoremediasyon) için önemlidir.

6. Kaynaklar

- Aravind, P., Prasad, MNV. 2003. Zinc alleviates cadmium-induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* L.: a free floating freshwater macrophyte. *Plant Physiol. Biochem.*, 41:391-397.
- Baykan, 2007. Kursun nitrat (Pb(NO₃)₂) metal tuzunun *Daphnia magna* (Straus 1820)(Cladocera, Crustacea) üzerindeki akut toksik etkisinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, 62 s.
- Benavides, MP., Gallego, SM., Tomaro, ML. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 17:21-34.
- Chen, M., Zhang, L., Li, J., He, X., Cai, J. 2015. Bioaccumulation and tolerance characteristics of a submerged plant (*Ceratophyllum demersum* L.) exposed to toxic metal lead. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 122:313-321

- Das, S., Goswami, S., Talukdar, AD. 2016. Physiological responses of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms, to cadmium and its phytoremediation potential. *Turk. J. Biol.*, 40:84-94.
- Doğan, M. 2005. *Ceratophyllum demersum* L.'de kadmiyum klorür, sodyum klorür ve bunların kombinasyonlarının fizyolojik ve morfolojik etkileri. *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- El-Khatib, AA., Hegazy, AK., Abo-El-Kassem, AM. 2014. Bioaccumulation potential and physiological responses of aquatic macrophytes to pb pollution. *Int. J. Phytoremediation.*, 16:29-45.
- Hoagland, DR., Arnon, DI. 1950. The water-culture method for growing plants without soil, california agricultural experiment station. *Circular*, 347:1-32.
- Khellaf, N., Zerdaoui, M. 2009. Growth response of the duckweed *Lemna minor* to heavy metal pollution. *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 6:161-166.
- Koca, FD. 2010. Cr(III) ve Cr(VI) maruziyetinde *Ceratophyllum demersum* L.'nin biyolojik cevabı: konsantrasyon ve uygulama periyodunun etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Lesmana, SO., Febriana, N., Soetaredjo, FE., Sunarso, J., Ismadji, S. 2009. Studies on potential applications of biomass for the separation of heavy metals from water and wastewater. *Biochem. Eng. J.*, 44:19-41.
- Mishra, S., Tripathi, RD., Srivastava, S. 2008. Thiol metabolism play significant role during cadmium detoxification by *Ceratophyllum demersum* L.. *Bioresour. Technol.*, 100:2155-2161.
- Murashige, T., Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Plant Physiol.*, 15:473-497.
- Nagajyoti, PC., Lee, KD., Sreekanth, TVM. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett.*, 8:199-216.
- Nath, K., Saini, S., Sharma, YK. 2005. Chromium in tannery industry effluent and its effect on plant metabolism and growth. *J. Environ. Biol.*, 26:197-204.
- Oros, V., Ana, T. 2012. Ecotoxicological effects of heavy metals on duckweed plants (*Lemna minor*). I. tests for growth rate reducing by cadmium. *Sci. Bull. Ser. D*, 26:7-14.
- Öktüren, Asri, F., Sönmez, S. 2006. Ağır metal toksisitesinin bitki metabolizması üzerine etkileri. *Derim*, 23:36-45.
- Piotrowska, A., Bajguz, A., Godlewska-Z' ylkiewicz, B., Czerpak, R., Kaminska, M. 2009. Jasmonic acid as modulator of lead toxicity in aquatic plant *Wolffia arrhiza* (Lemnaceae). *Environ. Exp. Bot.*, 66:507-513.

- Radić, S., Stipanićev, D., Cvjetko, P., Mikelić, IL., Rajčić, MM., řirac, S., Pevalek-Kozlina, B., Pavlica, M. 2010.** Ecotoxicological assessment of industrial effluent using duckweed (*Lemna minor* L.) as a test organism. *Ecotoxicology*, 19:216-222.
- Sánchez, D., Graça, MAS., Canhoto, J. 2007.** Testing the use of the water milfoil (*Myriophyllum spicatum* L.) in laboratory toxicity assays. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 78:421-426.
- Shanker, AK., Cervantes, C., Tavera, HL., Avudainayagam, S. 2005.** Chromium toxicity in plants. *Environ. Int.*, 31:739-753.
- Sharma, P., Dubey, RS. 2005.** Lead toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 17:35-52.
- Sinha, S., Saxena, R., Singh, S. 2005.** Chromium induced lipid peroxidation in the plants of *Pistia stratiotes* L: role of antioxidants and antioxidant enzymes. *Chemosphere*, 58: 598-604.
- Üçüncü, E. 2011.** Su mercimeği (*Lemna minor* Linneaus 1753) kullanılarak farklı konsantrasyonlardaki ağır metal (Cu, Cr ve Pb) karışımlarının laboratuvar ortamında biyoremediasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Yıldız, M., Terzi, H., Uruřak, B. 2011.** Bitkilerde krom toksitesini ve hücrese cevaplar. *E.Ü. Fen Bilimleri Enst. Derg.*, 27:163-176.
- Zengin, KF., Munzuroğlu, Ö. 2005.** Fasulye fidelerinin (*Phaseolus vulgaris* L. Strike) klorofil ve karotenoid miktarı üzerine bazı ağır metallerin (Ni^{+2} , Co^{+2} , Cr^{+3} , Zn^{+2}) etkileri. *F.Ü. Fen Müh. Bil. Derg.*, 17:164-172.