KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(3), 2026
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 29(3), 2026
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 30.03.2026
Kabul Tarihi : 14.07.2026

Received Date : 30.03.2026
Accepted Date : 14.07.2026

MADEN SAHASI DRENAJ SULARININ ETKİSİNDE BULUNAN *Phragmites australis*'DE AĞIR METAL AKÜMÜLASYONUNUN DEĞERLENDİRİLMESİ

ASSESSMENT OF HEAVY METAL ACCUMULATION IN *Phragmites australis* EXPOSED TO MINE SITE DRAINAGE WATERS

Şule TATAR YOLCULAR[1*] (ORCID: 0000-0001-8962-0107)
Ebru KIZILTOPRAK[2] (ORCID: 0009-0009-6046-7183)

[1] Munzur Üniversitesi, İktisadi İdari Bilimler Fakültesi, Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, Tunceli, Türkiye
[2] Munzur Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tunceli, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Şule TATAR YOLCULAR, sytatar@munzur.edu.tr

ÖZET

Bu araştırmada, Tunceli ili Hozat bölgesinde geçmişte madencilik faaliyetlerinin yürütüldüğü bir sahada; su, sediment ve *Phragmites australis* örneklerinde bazı ağır metallerin birikim düzeyleri değerlendirilmiştir. Madencilik faaliyetleri sonrasında drenaj sularının deşarj edildiği alanlarda ağır metal yükünün artış gösterebildiği bilinmektedir. Bu kapsamda çalışmanın ilk aşamasında, *P. australis*'in yoğun olarak bulunduğu noktalardan su ve sediment örnekleri toplanmıştır. Toplanan bitki örneklerinde Ag, Ba, Cd, Cu, Ni, Pb, Sr ve Zn elementleri açısından; metalin topraktan köke, kökten gövdeye ve yaprağa taşınma ve birikim düzeyleri incelenmiştir. Arazi çalışmaları sonucunda elde edilen su, sediment ve bitki örnekleri, Kanada ACME Analitik Laboratuvarı'nda ICP-MS yöntemi kullanılarak söz konusu elementler için ultra düşük dedeksiyon limitlerinde analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, *P. australis*'in mevcut çevresel koşullar altında Cd, Cu ve Sr açısından anlamlı bir biyoakümülasyon potansiyeline sahip olduğunu; buna karşın Ag, Ba, Ni, Pb ve Zn için etkin bir biriktirici özellik göstermediğini ortaya koymuştur. Bulgular, belirli ağır metallerin uygun bitki türleri aracılığıyla ortamdan uzaklaştırılabileceğini ve bu türlerin ilgili metaller için biyoakümülatör olarak işlev görebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *Phragmites australis*, biyoakümülatör, maden, sediment, ağır metal

ABSTRACT

In this study, the accumulation levels of selected heavy metals were evaluated in water, sediment, and *Phragmites australis* samples collected from a site in the Hozat district of Tunceli Province where mining activities had been conducted in the past. It is well established that heavy metal loads may increase in areas receiving drainage discharges following mining operations. Within this framework, water and sediment samples were collected at the initial stage of the study from locations densely populated by *P. australis*. In the plant samples, the translocation and accumulation levels of Ag, Ba, Cd, Cu, Ni, Pb, Sr, and Zn were investigated, specifically examining the transfer of these metals from soil to root, from root to stem, and from stem to leaf tissues. The water, sediment, and plant samples obtained during the field studies were analyzed for the aforementioned elements at ultra-low detection limits using the ICP-MS method at the ACME Analytical Laboratories in Canada. The analytical results indicated that, under the prevailing environmental conditions, *P. australis* possesses a significant bioaccumulation potential for Cd, Cu, and Sr. In contrast, it did not exhibit an effective accumulation capacity for Ag, Ba, Ni, Pb, and Zn. These findings suggest that certain heavy metals may be removed from the environment through appropriate plant species and that such species may function as bioaccumulators for specific metals.

Keywords: *Phragmites australis*, bioaccumulator, mine, sediment, heavy metal

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

GİRİŞ

Yeryüzünde doğal olarak bulunan ve canlı organizmalar tarafından yüksek miktarlarda gereksinim duyulan elementlerde H, C, N, O, P, Na, Mg, S, Cl, K ve Ca makro elementler ve organizmalar için gereksinimi daha düşük düzeyde olan elementlerden B, F, Si, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Se, Mo ve Sn ise mikro elementler olarak sınıflandırılmaktadır (Öner, 1987). Birçok canlı, yaşam faaliyetleri için eser miktarlarda dahi olsa ihtiyacı olan bu elementlerin eksiklik veya fazlalığında zarar görür. Bunların dışında biyokimyasal işlevleri tam olarak bilinmeyen ve canlı organizmalar için birinci derece öneme sahip olmayan fakat tolerans sınır konsantrasyonlarını aştığı takdirde toksisiteye sebebiyet veren elementler de (As, Cd, Pb, Sb, Ti ve U) bulunmaktadır (Keser, 2005). Birçok kaynaktan (evsel, endüstriyel, madencilik, tarımsal aktiviteler vs.) çevreye bırakılan ağır metallerin yayılım hızlarına bakıldığında doğal proseslerle uzaklaştırılandan daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle de ağır metaller çevrede birikim yapmaya devam etmektedir (Rai vd., 2002). Bunların neden olduğu en önemli sorun, besin zincirine katılmaları ve kullanma sularında kontaminasyona neden olma ihtimalleridir (Dinges, 1982; Jamil vd., 1987). Sulardan ağır metal giderimi için yaygın olarak kullanılan klasik metotlar; kimyasal çöktürme, membran teknolojileri, iyon değiştirme, solvent ekstraksiyonu, elektrokimyasal işlemler, adsorpsiyon vb. işlemlerdir (Veglio vd., 2002; Kaewsarn, 2002; Sekhar vd., 2003; Lee & Rowell, 2004; Ahluwalia & Goyal, 2007). Bu yöntemler genellikle büyük ölçüde enerji gereksinimi duyan karmaşık sistemlerdir ve aynı zamanda da sudaki değerli besinlerin yeniden kullanımını da ortadan kaldırmaktadır (Gijzen, 2002). Aynı zamanda bu yöntemler çeşitli metaller için farklı giderim verimine sahip olmakta ve düşük konsantrasyonlarda metal ve büyük hacimli sular olduğunda oldukça maliyetli olmaktadır (Miretzky vd., 2004; Hou vd., 2007). Bu nedenle son zamanlarda klasik yöntemlere alternatif olarak bitkisel arıtım sistemleri olarak adlandırılan fitoremediasyon teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Gijzen, 2002; Malik, 2004).

Ağır metallerin doğal ortamlarda birikimi; erozyon süreçleri, kayaç ve minerallerin ayrışması, orman yangınları ile volkanik aktiviteler gibi çeşitli jeolojik ve çevresel etmenlerin etkisiyle gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, geçmişte işletilmiş ancak günümüzde faaliyet göstermeyip terk edilmiş olan maden sahaları, uzun yıllar faal olmuş madencilik bölgeleri ve atık depolama alanları, ağır metallerin çevresel ortamlara yayılımını artırarak ekosistem üzerinde toksik etkiler oluşturabilmektedir. Bu metallerin besin zinciri aracılığıyla canlı organizmalara taşınması ise hem çevre sağlığı hem de insan sağlığı açısından risk teşkil etmektedir (Şavran & Küçük, 2022).

Phragmites australis, Türkiye'de çoğunlukla su kenarlarında gelişim göstermektedir (Seyithanoğlu, 2007). Bu tür makrofitler, metalleri biyokütlelerinde yüksek konsantrasyonlarda biriktirebilme kapasitesine sahiptir (Say vd., 1981). Bu özellikleri sayesinde, sucul ortamlardaki kimyasal kirleticilerin belirlenmesinde ve su kalitesinin değerlendirilmesinde biyogösterge olarak kullanılabilmektedirler (Lewis, 1995).

Bu çalışmanın temel amacı, Tunceli ili Hozat ilçesinde yer alan eski bir maden işletme sahasında; su, sediment ve bölgede baskın olarak yayılış gösteren *P. australis* türünün kök, gövde ve yaprak dokularında bazı ağır metallerin birikim düzeylerini belirlemektir. Sucul ekosistemlerde ağır metalleri absorbe ve akümüle edebilme yeteneğine sahip makrofitlerin kullanımı, biyoteknolojik temelli bir yaklaşım sunduğundan, araştırmada bu yöntem tercih edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu araştırma, Tunceli ili Geyiksuyu Köy sınırlarında, K39°10′48″ ve D39°24′18″ koordinatlarına sahip Sin Mezrası olarak bilinen eski bir maden işletme sahasında Mayıs ayında yürütülmüştür. Çalışma alanında, maden drenaj sularının deşarj edildiği ortamlarda doğal olarak gelişen sucul makrofitlerin belirlenmesi amacıyla arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda bölgede baskın tür olarak yayılış gösteren *Phragmites australis* araştırma materyali olarak seçilmiştir.

Toplanan bitki örnekleri önce laboratuvar ortamındaki şebeke suyu, ardından da saf su ile yıkanarak yüzeysel kirleticilerden arındırılmış ve süzgeç kâğıdı üzerinde kurutulmuştur. Takiben bitki örnekleri kök, gövde, yaprak şeklinde kısımlarına ayrılmış; 60 °C'de etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur. Kurutulan bitki dokuları 300 °C'de kül fırınında 24 saat bekletilerek kül haline getirilmiş ve her bir örneğin kül miktarı tartım yoluyla belirlenmiştir. Kül örneklerinden 1 g alınarak HNO_3 ve Kral Suyu (1:1) karışımı içerisinde çözündürülmüştür. Bitkilerin kök bölgesinden, yaklaşık 20–60 cm derinlikten alınan sediment örnekleri ise kaba elemeden geçirildikten sonra 100 °C'de kurutulmuş ve HNO_3 ile Kral Suyu karışımında 95 °C'de 1 saat süreyle bekletilerek sindirilmiştir. Maden drenaj sularından alınan numuneler plastik kaplara toplanmış; laboratuvara getirilen su örneklerinin bir kısmında

sıcaklık, elektriksel iletkenlik, bulanıklık, pH, nitrat ve bikarbonat gibi fizikokimyasal parametreler YSI Professional Plus model multiparametre cihazı ile ölçülmüş, diğer kısmı ise metal analizleri için ayrılmıştır. Su, sediment ve bitki örneklerinin tamamı element analizleri amacıyla Kanada'daki ACME laboratuvarına gönderilmiş ve Perkin Elmer Elan 9000 marka ICP-MS cihazı kullanılarak analiz edilmiştir.

Bitkilerin fitoremediasyon potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla kök, gövde ve yaprak için ayrı ayrı biyokonsantrasyon faktörleri (sırasıyla, BKF-K, BKF-G, BKF-Y) ile translokasyon faktörü (TLF) hesaplanmıştır. BKF değerleri, ilgili bitki dokusundaki metal konsantrasyonunun sedimentteki metal konsantrasyonuna oranlanmasıyla elde edilmiştir (1) ve metalin bitki dokularında birikim kapasitesini göstermektedir. BKF'nin 1'den büyük olması bitkinin hiperakümülatör özelliğe sahip olduğunu, 1'den küçük olması ise metal dışlayıcı davranış sergilediğini ifade etmektedir (Zhang vd., 2002). Translokasyon faktörü ise metalin kökten yaprağa taşınma oranını göstermekte olup (2), TLF değerinin 1'in üzerinde olması bitkinin metali etkin biçimde üst organlara aktarabildiğini ve hiperakümülatör olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir (Deng vd., 2004).

$$BKF = \frac{Bitki\ dokusundaki\ metal\ konsantrasyonu\ (\frac{mg}{kg})}{Sedimentteki\ metal\ konsantrasyonu\ (\frac{mg}{kg})} \quad (1)$$

$$TLF = \frac{Yapraktaki\ metal\ konsantrasyonu\ (\frac{mg}{kg})}{Kökteki\ metal\ konsantrasyonu\ (\frac{mg}{kg})} \quad (2)$$

BULGULAR

Tablo 1 ve Tablo 2'de, çalışma sahasından alınan su numunelerine ait analiz sonuçları, Tablo 3'te sediment ve *P. australis* bitkisinde tespit edilen ağır metal konsantrasyonları (kuru ağırlık) ve Tablo 4'te BKF-K, BKF-G, BKF-Y ve TLF değerleri verilmiştir. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY, 2008) ve Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği (YSKY, 2015) verilerine göre maden sahası drenaj sularında bulunan ağır metallerin su kalitesini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir.

Tablo 1. Maden Sahası Drenaj Sularının Fiziko-Kimyasal Özellikleri ve YSKY Su Kalite Değerleri

		Su Kalite Sınıfları (YSKY)			
Parametre	**Maden yatağı**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Sıcaklık, °C	22,4				
Bulanıklık, NTU	17,00				
pH	8,05	6-9	6-9	6-9	6-9
EC, mS/cm	1,64	< 400	1000	3000	> 3000
HCO_3^-, mg/L	194				
NO_3^-, mg/L	3,01	< 3	10	20	> 20

Tablo 2. Maden Sahası Drenaj Sularındaki Ağır Metal Konsantrasyonları ve SKKY Su Kalite Değerleri

		Su Kalite Sınıfları (SKKY)			
Parametre (µg/L)	**Maden yatağı**	**I**	**II**	**III**	**IV**
Ag	95	-	-	-	-
Ba	105	1000	2000	2000	> 2000
Cd	650	3	5	10	> 10
Cu	653	20	50	200	> 200
Ni	255	20	50	200	> 200
Pb	3604	10	20	50	> 50
Sr	13723	-	-	-	-
Zn	1421	200	500	2000	> 2000

Elde edilen bulgular sedimentte ölçülen metal konsantrasyonları ile bitkinin kök, gövde ve yaprak dokularında belirlenen değerler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Ag açısından, sedimentte saptanan konsantrasyonların bitkinin tüm organlarındaki değerlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca BKF-K, BKF-G, BKF-Y ve TLF değerlerinin tamamı 1'in altında bulunmuştur.

Tablo 3. Sediment ile *Phragmites australis* Bitkisinde Tespit Edilen Ağır Metal Konsantrasyonları (µg/kg)

Parametre	Numune (µg/kg)			
	Sediment	**Kök**	**Yaprak**	**Gövde**
Ag	906	225	11,07	18,13
Ba	184771	72301	6725	2682
Cd	3406	4734	6724	2613
Cu	655304	79560	113030	217973
Ni	78304	17249	5627	3843
Pb	65307	4213	152	3843
Sr	207136	200156	149372	48681
Zn	341187	83810	24512	44219

Tablo 4. *Phragmites australis* Bitkisinde Tespit Edilen TLF, BKF-K, BKF-G ve BKF-Y değerleri

Parametre	**TLF**	**BKF-K**	**BKF-G**	**BKF-Y**
Ag	0,05	0,25	0,02	0,01
Ba	0,09	0,39	0,01	0,04
Cd	7,85	0,25	0,77	1,97
Cu	0,14	1,28	0,33	0,17
Ni	0,33	0,22	0,05	0,07
Pb	0,04	0,65	0,06	0,02
Sr	0,75	0,97	0,24	0,72
Zn	0,29	0,25	0,13	0,07

Elde edilen bulgular sedimentte ölçülen metal konsantrasyonları ile bitkinin kök, gövde ve yaprak dokularında belirlenen değerler karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Ag açısından, sedimentte saptanan konsantrasyonların bitkinin tüm organlarındaki değerlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca BKF-K, BKF-G, BKF-Y ve TLF değerlerinin tamamı 1'in altında bulunmuştur.

Ba için de benzer bir dağılım gözlenmiş; sediment konsantrasyonlarının bitki dokularındaki seviyelerden daha yüksek olduğu ve tüm biyokonsantrasyon faktörleri ile translokasyon faktörünün 1'den küçük çıktığı tespit edilmiştir.

Cd bakımından ise sediment konsantrasyonunun kökte daha düşük, gövde ve yaprakta daha yüksek olduğu belirlenmiştir. TLF ve BKF-Y değerleri 1'in üzerinde, BKF-K ve BKF-G değerleri ise 1'in altında bulunmuştur.

Cu için sediment konsantrasyonunun kökten daha yüksek, ancak gövde ve yapraktan daha düşük olduğu belirlenmiştir. BKF-K değeri 1'in üzerinde bulunmuştur. Buna karşın BKF-G, BKF-Y ve TLF değerlerinin 1'in altında olduğu tespit edilmiştir.

Ni ve Pb açısından, sedimentte ölçülen konsantrasyonların bitki dokularındaki değerlerden daha yüksek olduğu ve tüm biyokonsantrasyon ile translokasyon faktörlerinin 1'in altında kaldığı belirlenmiştir.

Sr için sediment konsantrasyonları bitki dokularından daha yüksek olmakla birlikte, BKF-G değeri hariç diğer faktörlerin 1'e oldukça yakın olduğu saptanmıştır.

Zn açısından da sediment konsantrasyonlarının bitki organlarındaki değerlerden daha yüksek olduğu ve tüm BKF ile TLF değerlerinin 1'in altında kaldığı belirlenmiştir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Atıksu arıtma tesisi deşarj sularının alıcı ortamlara doğrudan verilmeden önce *S. lacustris* ve *P. australis* bitkilerinden oluşan sazlık alanlardan geçirilmesi ve böylelikle arıtımla çöktürülememiş ağır metallerin bitki bünyesinde tutularak giderilmesi sağlanabilir. Bu bitkilerin kökleri tarafından akümüle edilen Pb, Cr, Ni ve Cd'un gövde ve yaprak kısımlarına transferinin düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Pb, Cd ve Cr elementleri bitkiler için gerekli temel elementler olmamakla birlikte toksik etkiye de sahiptirler. Bu etkiyi azaltmak için, bitkinin kök ve gövdesinde depolanmakta ve yaprağa iletilmemektedir. Ayrıca Mn, Zn ve Cu gibi bitkiler için gerekli temel elementlerin bitkilerde transferinin yüksek olduğu belirlenmiştir (Duman, 2005). Aynı çalışmada sediment örneklerindeki faktör

analizi verilerine göre sulardaki ağır metal kirliliğine neden olan etmenlerin aynı şekilde sediment kirliliğine de sebebiyet verdiği ve bitkinin farklı kısımlarında ağır metal konsantrasyonlarının farklılık gösterdiği görülmüştür. Genellikle gövde ve yapraklara kıyasla köklerde daha yüksek miktarlarda ağır metal bünyelerinde bulunmuştur. Bitki kısımlarının metal dağılımındaki farklar, bitki dokularındaki metabolik durumlara ve metal birikimi arasındaki ilişkiye bağlanmıştır. Çalışmada, *P. australis*'in kullanılan diğer bitkilere nazaran Pb, Cr, Cu ve Ni'i daha iyi akümüle ettiği, bitkinin biyolojik filtre olarak öneme sahip olduğu ve bu verilerin daha önceki çalışmada elde edilen bulgularla (Duman, 2001) uyum içerisinde olduğu, metal akümülasyonunun yalnızca fiziki çevresel şartlarla değil bitkinin fizyolojik mekanizmasıyla da ilişkili olduğu ve ağır metallerin köklerde daha yüksek akümülasyonunun önemli bir nedeni olduğu görülmüştür.

Shahraki vd. (2008), bir bakır madeni çevresindeki topraklarda gelişen karasal bitkilerde Sr birikimini araştırmış; P. australis'in kök ve sürgün dokularında Sr konsantrasyonlarını sırasıyla 47,4 ppm ve 132 ppm olarak rapor etmiştir. Bu bulgular, söz konusu türün belirli çevresel koşullar altında Sr'u bünyesinde biriktirebildiğini göstermektedir.

Aynı örnekleme noktasından temin edilen farklı bitki türlerinde ağır metal konsantrasyonlarının değişkenlik gösterebildiği bilinmektedir. Bununla birlikte, aynı cinse ait farklı türlerin dahi benzer çevresel koşullar altında metal birikim düzeyleri bakımından farklı sonuçlar ortaya koyabildiği ifade edilmektedir (Sawidis vd., 1995). Bu durum, bitkiler arası fizyolojik ve morfolojik farklılıkların metal alımı ve taşınımı üzerinde belirleyici olabileceğini göstermektedir.

Karn (2021) ise fiziksel ve kimyasal arıtım yöntemlerinin uygulanmasında önemli kısıtlılıkların bulunduğunu ve kirleticilerin giderimi için yüksek maliyetli yatırımlar gerektiğini vurgulamaktadır. Ağır metal uzaklaştırma tekniklerinin ekonomik açıdan pahalı olması nedeniyle uygulamada sınırlı kaldığını belirten araştırmacı, buna karşılık biyoremediasyon yaklaşımının kirlenmiş nehir ve akarsu sistemlerinin iyileştirilmesinde güvenilir ve uygulanabilir bir alternatif yöntem olduğunu söylemektedir.

Literatüre yer edinen bu gibi çalışmalar karşılaştırıldığında, aynı bitki türünün bazı araştırmalarda belirli metaller açısından etkin bir biyoakümülatör olarak tanımlanmasına karşın, diğer çalışmalarda benzer bir performans sergilemediği görülmektedir. Bu farklılıkların; su ve sedimentin fiziko-kimyasal özelliklerindeki değişkenlikler, metalin biyoyararlanabilirliği ve çevresel faktörlerin etkisi gibi nedenlere bağlı olarak ortaya çıkabileceği değerlendirilmektedir.

Bu araştırmada, Tunceli ilinde yer alan maden yatağı çıkış suları çalışma alanı olarak belirlenmiş ve sahada baskın tür olarak yayılış gösteren *Phragmites australis* örnekleme materyali olarak seçilmiştir. Bölgeden alınan su, sediment ve bitki örneklerinde tespit edilen Ag, Ba, Cd, Cu, Ni, Pb, Sr ve Zn elementlerinin biyoakümülasyon potansiyelleri değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, *P. australis*'in mevcut çevresel şartlar altında Cd, Cu ve Sr açısından birikim kapasitesine sahip olduğunu; buna karşılık Ag, Ba, Ni, Pb ve Zn için etkin bir biyoakümülatör özellik göstermediğini ortaya koymuştur.

Ag açısından, BKF-K, BKF-G, BKF-Y ve TLF değerlerinin tamamının 1'in altında olması, *P. australis*'in Ag için etkin bir biyoakümülatör özellik göstermediğini ortaya koymaktadır. Ba için de benzer bir dağılım gözlenmiş; tüm biyokonsantrasyon faktörleri ile translokasyon faktörünün 1'den küçük çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum, *P. australis*'in Ba birikimi açısından da uygun bir tür olmadığını göstermektedir. Cd bakımından ise TLF ve BKF-Y değerlerinin 1'in üzerinde, BKF-K ve BKF-G değerlerinin ise 1'in altında olması, Cd'un kökte tutulmadan üst organlara taşınabildiğini göstermektedir. Özellikle translokasyon faktörünün yüksek olması, Cd'un bitki bünyesinde etkin biçimde taşındığını ve *P. australis*'in bu metal için biyoakümülasyon potansiyeline sahip olduğunu düşündürmektedir. Cu için BKF-K değerinin 1'in üzerinde olması, kök dokusunun Cu birikimi bakımından oldukça önemli bir gösterge olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Buna karşın BKF-G, BKF-Y ve TLF değerlerinin 1'in altında olması, metalin üst organlara etkin biçimde taşınmadığını göstermektedir. Ni ve Pb açısından, tüm biyokonsantrasyon ile translokasyon faktörlerinin 1'in altında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, *P. australis*'in hem Ni hem de Pb için etkin bir biyoakümülatör özellik sergilemediğini göstermektedir. Sr için BKF-G değeri hariç diğer faktörlerin 1'e oldukça yakın olduğu saptanmıştır. Bu bulgu, *P. australis*'in Sr birikimi açısından potansiyel gösterebileceğine işaret etmektedir. Zn açısından da tüm BKF ile TLF değerlerinin 1'in altında kaldığı belirlenmiştir. Dolayısıyla *P. australis*'in Zn biyoakümülasyonu bakımından uygun bir tür olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Su ortamlarının ağır metaller ile kontamine olması, çevre ve insan sağlığı yönünden önemli riskleri beraberinde getirmektedir. Kurşun, cıva ve kadmiyum gibi metaller suda çözünerek içme suyu kaynaklarına ulaşabilmekte ve uzun süreli maruziyet durumunda toksik etkilere neden olabilmektedir. Bu metaller, sulama suyu aracılığıyla veya doğrudan su kaynakları üzerinden bitkilere geçmekte; bitkiler tarafından kök yoluyla alınarak üst organlara taşınmaktadır. Bu süreç, tarımsal üretimde kalite kaybına yol açabildiği gibi, bitkileri tüketen hayvanlar aracılığıyla trofik zincir boyunca taşınarak biyobirikime neden olmaktadır.

Sucul ekosistemlerde ağır metal varlığı, balıklar ve diğer sucul organizmalar üzerinde olumsuz etkiler oluşturmakta; özellikle üreme kapasitesinin azalmasına ve ekosistem dengesinin bozulmasına yol açabilmektedir. Ayrıca sanayi atıkları, madencilik faaliyetleri ve tarımsal uygulamalar sonucu ağır metallerin toprağa taşınması, toprak verimliliğini azaltmakta ve bitkisel üretimi olumsuz etkilemektedir. Bunun yanında suyun kimyasal özelliklerinde, özellikle pH gibi parametrelerde değişimlere neden olarak su kalitesini düşürebilmektedir.

Ağır metal kirliliği ve buna bağlı ekolojik riskler, günümüzde önemli çevresel sorunlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle kirlenmiş alanların rehabilitasyonu amacıyla uygun arıtım teknolojilerinin ve sürdürülebilir yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Ağır metallerle kontamine olmuş suların, *Phragmites australis* gibi metal biriktirme kapasitesine sahip sucul makrofitlerle kaplı doğal veya yapay sazlık sistemlerinden geçirilerek alıcı ortamlara verilmesi, çevresel risklerin azaltılması açısından etkili bir biyoremediasyon yaklaşımı olarak değerlendirilebilir.

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Bu makale tamamen herhangi bir yapay zeka aracının yardımı olmadan yazılmış, düzenlenmiş, analiz edilmiş ve hazırlanmıştır. Metin, veri analizi ve şekiller dahil tüm içeriğin yalnızca yazarlar tarafından oluşturulduğunu beyan ederim.

Teşekkür

Bu çalışma Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (MUNİBAP) Biriminin YLMUB021-30 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Ahluwalia S.S., & Goyal D. (2007). Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology, 98,* 2243-2257. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.12.006

Deng, H., Ye, Z.H., & Wong, M.H. (2004). Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environmental Pollution, 132*(1), 29-40. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.03.030

Dinges, R. (1982). Aquatic Plant Systems. An Unconvential Approach to Removal of Toxic Materials. Presented of The Tenth Water Resource Symposium, Toxic Materials- Methods of Control, University of Texas, Austin, Texas.

Duman, F. (2001). Sanmsaklı-Karasu'da yetişen Phragmites australis (Cav.) Trin ex.steud ve Typha angustifolia L. bitkileri ve bunları çevreleyen sedimentlerde ağır metal tayini. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, 44s., Kayseri.

Duman, F. (2005). Sapanca ve Abant Gölü su, sediment ve sucul bitki örneklerinde ağır metal konsantrasyonlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, 253 s., Ankara.

Gijzen, H.J. (2002). Anaerobic digestion for sustainable development: a natural approach. Water Science and Technology, 45(10), 321-328. https://doi.org/10.2166/wst.2002.0364

Hou, W., Chen, X., Song, G., Wang, Q., & Chi Chang, C. (2007). Effects of copper and cadmium on heavy metal polluted waterbody restoration by duckweed (L. minor). Plant Physiology and Biochemistry, 45, 62-69. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.12.005

Jamil, K., Madhavendra, S.S., Jamil M., & Rao, P.V.R. (1987). Studies on Water Hyacinth as a Biological Filtre for Treating Contaminants from Agricultural Waste and Industrial Effluents. J. Environ. SCL. Health, B 22 (1), 103-112. https://doi.org/10.1080/03601238509372548

Kaewsarn, P. (2002). Biosorption of Copper (II) from Aqueous Solutions By Pre-treated Biomass of Marine Algae Padina sp. Chemosphore, 47, 1081-1085. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00324-1

Karn, R., Ojha, N., Abbas, S., & Bhugra, S. (2021). A review on heavy metal contamination at mining sites and remedial techniques. Community Based Research and Innovations in Civil Engineering, 796, 012013. https://doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012013

Keser, G. (2005). Nasturtium officinale R. Br.'de kurşunun strese bağli enzimlerin aktivitelerine, gelişmeye, mineral ve klorofil içeriğine etkileri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Lee, B.G. & Rowell, R.M. (2004). Removal of heavy metals ions from aqueous solutions using lignocellulosic fibers. Journal of Natural Fibers, 1, 97-108. https://doi.org/10.1300/J395v01n01_07

Lewis, M.A. (1995). Use of freshwater plants for phytotoxicity testing: a review. Environmental Pollution, 87(3), 319–336. https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)P4164-J

Malik, A. (2004). Metal Bioremediation Through Growing Cells. Environment International, 30, 261–278. https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.08.001

Miretzky, P., Saralegui, A., & Cirelli, A.F. (2004). Aquatic Macrophytes Potential for the Simultaneous Removal of Heavy Metals (Buenos Aires, Argentina). Chemosphere, 57, 997–1005. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.07.024

Öner, M. (1987). Mikrobial Ekoloji. Ege Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kitaplar Serisi, 100, 273-274.

Rai, U.N., Tripathi, R.D., Vajpayee, P., Vidyanath, Jha., & Ali, M.B. (2002). Bioaccumulation of toxic metals (Cr, Cd, Pb and Cu) by seeds of Euryale ferox Salisb (Makhana). Chemosphere, 46, 267–272. https://doi.org/10.1016/s0045-6535(01)00087

Sawidis, T., Chettri, M.K., Zachariadis, G.A., & Stratis, J.A. (1995).Heavy metals in aquatic plant and sediments from water systems in Macedonia, Greece. Ecotoxicol.and Environ. Safety, 32, 73-80. https://doi.org/10.1006/eesa.1995.1087

Sekhar, K.C., Kamala, C.T., Chary, N.S., & Anjaneyulu, Y. (2003). Removal of heavy metals using a plant biomass with reference to environmental control. The International Journal of Mineral Processing, 68, 37-45. https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00047-9

Şavran, G, & Küçük, F. (2022). Sucul canlılarda ağır metal birikimi ve etkileri. Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi, 8(1), 65-78. https://izlik.org/JA44KD46YH

Shahraki, S.A., Ahmadimoghadam, A., Naseri, F., & Esmailzade, E. (2008). Study the Accumulation of Strontium in Plant Growing around Sarcheshmeh Copper Mine, Iran. VSB Technical University of Ostrava, Ostrava,. 239–242.

Say, P.J., Harding, J.P.C., & Whitton, B.A. (1981). Aquatic mosses as monitors of heavy metal contamination in the river etherow, great britain. Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical, 2(4), 295-307. https://doi.org/10.1016/0143-148X(81)90026-4

SKKY, (2008). T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, (13 Şubat 2008, Sayı: 26786), Resmi Gazete.

Veglio, F., Esposito, A., & Reverberi, A.P. (2002). Copper Adsorption on Calcium Alginate Beads: Equilibrium pH-Related Models. Hydrometallurgy, 65, 43–57. https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00064-6

YSKY, (2015). T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Yüzeysel Su Kalitesi Yönetmeliği'nde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, (15 Nisan 2015, Sayı: 29327), Resmi Gazete.