



<http://dergipark.org.tr/tr/pub/anatolianbryology>

DOI: 10.26672/anatolianbryology.1703780

Anatolian Bryology
Anadolu Briyoloji
Dergisi
Research Article
e-ISSN:2458-8474
Online



Biyomonitör Karayosunları Kullanılarak Atmosferik Polisiklik Aromatik Hidrokarbonların ve İz Elementlerin Birikimlerinin Belirlenmesi: Kocaeli Örneği

Gülsüm KOÇAK¹*, Muhammet ÖREN¹, Hasan ÇABUK²

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Zonguldak, TÜRKİYE

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Zonguldak, TÜRKİYE

Received: 21 May 2025

Revised: 10 June 2025

Accepted: 11 June 2025

Öz

Karayosunları, vasküler bitkilerle karşılaştırıldığında geniş alanlara dağılım göstermeleri, yapılarının bu bitkilere kıyasla az gelişmiş olması sebebiyle biyomonitör olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada, 52 lokaliteden toplanan *Hypnum cupressiforme* Hedw. ve 22 lokaliteden toplanan *Pseudoscleropodium purum* (Hedw.) M.Fleisch. kullanılarak, Kocaeli ilinin atmosferik polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) ve iz elementlerin konsantrasyon değerleri araştırılmıştır. Bu türlerdeki iz elementlerin analizleri indüktif eşleşmiş plazma-kütle spektrometresi (ICP-MS), PAH analizleri ise yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) ile yapılmıştır. Çalışma sonucunda ortalama PAH konsantrasyon değeri 193.84 ng/g olarak tespit edilmiş olup, sırasıyla fenantren (60.98 ng/g) ve benzo[k]florenten (22.60 ng/g) en yüksek değere sahip iki bileşik olmuştur. İz element analiz sonuçlarında ise 4639.87 µg/g ile alüminyum en yüksek değere sahipken, 0.3 µg/g ile kadmiyum en düşük birikim gösteren ağır metal olmuştur. Konsantrasyon değerlerinin büyüken küçüğe Al>Fe>Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>V>Sn>Co>Mo>As>Sb>Hg>Cd olacak şekilde sıralandığı tespit edilmiştir. Pearson korelasyon analizi (SPSS Version 19.0) ile iz elementler ve PAH'lar arasındaki ilişkiler incelenmiş ve ikisi arasında anlamlı ilişki olduğu belirlenmiştir. *H. cupressiforme* ve *P. purum* örneklerinin birikim konsantrasyonları *t* testi ile karşılaştırılmıştır. *t* testi analizi sonucunda iki tür arasında benz[a]antrasen ve benzo[a]piren hariç diğer parametreler için istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu *H. cupressiforme*'nin daha fazla birikim yaptığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyolojik izleme, Kocaeli, karayosunu, iz elementler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar

Determination of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Trace Element Levels Using Moss Biomonitoring: A Case Study of Kocaeli

Abstract

Mosses are frequently preferred as biomonitors due to their distribution over wide areas and their underdeveloped structure compared to vascular plants. In this study, the concentration values of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and trace elements in Kocaeli province were investigated using *Hypnum cupressiforme* Hedw. collected from 52 localities and *Pseudoscleropodium purum* (Hedw.) M.Fleisch. collected from 22 localities. The analysis of trace elements in these species was carried out by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS), and PAH analyses were carried out by high-performance liquid chromatography (HPLC). As a result of the study, the average PAH concentration value was determined to be 193.84 ng/g, and the two compounds with the highest values were phenanthrene (60.98 ng/g) and benzo[k]fluorene (22.60 ng/g), respectively. In the trace element analysis results, aluminum had the highest value with 4639.87 µg/g, while cadmium was the heavy metal with the lowest accumulation with 0.3 µg/g. It was determined that the concentration values were ranked from largest to smallest as Al>Fe>Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>V>Sn>Co>Mo>As>Sb>Hg>Cd. The relationships between tracers and PAHs were examined using Pearson correlation analysis (SPSS Version 19.0), and it was determined that a significant relationship existed between the two. We compared the accumulation concentrations of *H. cupressiforme* and *P. purum* samples using a t-test. As a result of the t-test analysis, it was determined that there was a statistically significant difference between the two species for all parameters except benz[a]anthracene and benzo[a]pyrene, and *H. cupressiforme* accumulated more.

Keywords: Biomonitoring, Kocaeli, moss, trace elements, polycyclic aromatic hydrocarbons

* Corresponding author: glsmince4@gmail.com

To cite this article: Koçak G. Ören M. Çabuk H. 2025. Determination of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Trace Element Levels Using Moss Biomonitoring: A Case Study of Kocaeli. *Anatolian Bryology*. 11:1, 33-43.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution Non-Commercial 4.0 International License

1. Giriş

Bir organizmayı veya organizma grubunu çevreleyen koşulları ifade eden "Çevre" kelimesi, özellikle organizmanın büyüüp gelişmesi ve hayatta kalabilmesi için dış faktörlerin çeşitliliği olarak tanımlanmaktadır. Kara, su ve atmosferik oluşumların yanı sıra hayvanları, bitkileri ve abiyotik unsurları da kapsamaktadır. Son yıllarda iklim değişikliği ve çeşitli birçok faktörler ile birlikte hava kirliliğinin günümüzde oldukça yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. Bu durum insanlar ve ekosistem için önemli bir çevre sorunu olmaktadır (Salo ve ark., 2016; Macedo-Miranda ve ark., 2024). Özellikle kentleşme ve sanayinin artmasıyla birlikte ağır metal ve PAH emisyonları gün geçtikçe kayda değer bir artış göstermektedir. Endüstriyel üretim, enerji üretimi, evsel ısınma, ulaşım ve metalurji gibi sektörler aracılığıyla her yıl atmosfere ağır metal ve PAH'ların yayılması gelecek zamanlar için birer tehdit oluşturmaktadır (Aizezi ve ark., 2025).

İnsan ve çevre sağlığını etkileyen hava kirliliğinin izlenmesi son yıllarda artış göstermiştir. Bu amaçla yapılacak araştırmalar için farklı yöntemler geliştirilmektedir. Bunlar arasında yer alan biyolojik izleme yönteminde (biomonitoring) kirleticilerin çok iyi biriktirici oldukları bilindiği için karayosunu, liken ve diğer biyoidikatör organizmalar sıklıkla kullanılmaktadır (Demkova ve ark. 2017). Örneğin, su mercimeği (*Lemna minor* L.), tarımsal ve evsel atık sulardan besinleri ve ağır metalleri geri kazanmak için tercih edilen önemli türlerden biridir (Radic ve ark., 2011; Rezanian ve ark., 2016). Özellikle briyofitler (karayosunları, boynuzotları ve ciğerotları), enstrümantal ölçümlerle elde edilemeyen farklı ağır metaller arasındaki etkileşimler ve canlı sistemler üzerindeki etkiler hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu bitkiler, dünyada pek çok farklı doğal alanlarda bulunabildikleri gibi, endüstriyel ve kentsel alanlarda da rahatlıkla bulunabilmektedirler. Vasküler doku içermeyen ayrıca gelişmiş bir kutikula, gerçek kök, gövde ve yaprakları bulunmayan ilkel karasal bitkilerdir. Hayatta kalmaları için gereken besinleri tüm yüzeylerini kullanarak kendilerini çevreleyen sudan karşılamaktadır.

Bu ve bunun gibi daha birçok özelliklerinden dolayı hava kirliliği çalışmalarında biyomonitör olarak tercih edilmektedir. 1971 yılında Goodman ve Roberts tarafından tanıtılan "torba tekniği" özellikle kentsel alanlarda hava kirliliğini test etmede kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir (Goodman ve Roberts, 1971; Arndt ve Planer-Friedrich, 2018). Bunun haricinde, bu çalışmada da tercih edilen diğer yaygın bir yöntem ise yerel

örnekleme yöntemidir (Uyar ve ark., 2007, 2008, 2009; Çabuk ve ark., 2014; Ören ve ark., 2021). Bu türler atmosferik kirleticilerin belirlenmesinde ve takip edilmesinde göstergeleri iyi sonuç veren canlılar olarak kullanılmaktadır (Oishi, 2022; Gomez-Ensastegui ve ark., 2025). Briyofitler, sadece atmosferik kirliliğin izlenmesi çalışmalarında değil, aynı zamanda su ortamlarındaki kirliliğinin izlenmesinde de kullanılmaktadırlar. Ayrıca kirlenmiş toprak ve sudan kurşun, çinko, bakır, krom, kadmiyum ve demir gibi ağır metalleri biriktirebilme kabiliyetleri nedeniyle yüksek fitoremediasyon potansiyeli göstermektedirler (Molnar ve ark., 2024; Gezahegn ve ark., 2024).

Periyodik tabloda geçiş elementleri arasında yer alan ağır metaller, yer kabuğunda doğal olarak bulunabilirken, insan faaliyetleri sonucunda zararlı seviyelere kadar ulaşabilmektedirler. Sanayinin gelişmesi ile birlikte; artan fabrikalar, madenci ve sanayi atıkları, kanalizasyon deşarjı, kentsel akış ve toprak erozyonu kirlilik sebeplerinin başında yer almaktadır. Kurşun, berilyum ve civa gibi bazı metaller tehlikeli kabul edilirken, mangan ve kadmiyum gibi metaller ise potansiyel tehlike sınıfında yer almaktadırlar. Bakır, arsenik, kurşun, kadmiyum, çinko, krom ve nikel gibi ağır metaller atık sularda çoğunlukla tespit edilen ağır metaller arasında yer almakta olup ve insan sağlığı ve çevre için tehdit oluşturmaktadır (Rice ve ark., 2014; Jomova ve ark., 2025; Behrooz ve ark., 2025). Bu nedenle ağır metaller, çevresel ve ekolojik araştırmalarda önemli bir konu haline gelmiştir (Macklin ve ark., 2023). Aynı zamanda eritme tesisleri, pestisit üretimi ve kimya endüstrisi, petrokimya tesisleri ve dökümhaneler gibi pek çok tesis aracılığıyla da insanlar bu metallere maruz kalmaktadır (Mitra ve ark., 2022). Ağır metal kirliliğinin toprak kalitesi, su kalitesi, gıda güvenliği, insan sağlığı ve biyolojik çeşitlilik gibi alanlarda ciddi tehdit oluşturası sonucu toprak ağır metal kirliliği ciddi çevre sorunlarından biri olmuştur (Han ve ark., 2025). Aynı zamanda havada fazla birikim göstermeleri sonucunda insanlar ve diğer canlılar tarafından solunması durumunda solunum yolu ve kardiyolojik hastalıklar ile kansere kadar gidebilen ciddi rahatsızlıklara neden olmaktadır. Bu kirleticilerin toksisitesi giderek artış göstererek tüm organizmalar için endişe kaynağı oluşturmaktadır (Mitra ve ark., 2022; Jomova ve ark., 2025).

Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar (PAH), iki veya daha fazla benzen halkasına sahiptir ve organik maddelerin tam yanmaması sonucu ortaya çıkan bileşik grubudur (Xu ve ark., 2024; Suresh ve ark., 2025). Doğal kaynaklı olarak orman yangınları

ve volkanik patlamalar, insan kaynaklı olarak ise motorlu taşıtlar ve sanayi kaynaklı yollarla ortaya çıkmaktadırlar. Toksik ve kalıcı olduklarından dolayı çevresel izleme çalışmalarında önemli olup takipleri yapılmaktadır. Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA), 16 PAH bileşimini öncelikli kirleticiler listesine almıştır (Keith, 2015; Montano ve ark., 2025; Dhara ve ark., 2025). Bu maddeler DNA ile etkileşime girerek mutajenik ve kanserojen etki gösterebilmektedir. İnsanların birincil yollardan PAH'lara maruziyeti sigara kullanımı, kirli ortam havasının solunması ve kirlenmiş olan gıdaların tüketilmesidir. Yapılan çalışmalarda analiz yöntemleri arasında HPLC-FL, GC-MS, HPLC-UV ve GC-FID gibi kromatografik yöntemler yer almaktadır (Barbosa ve ark., 2023). Zonguldak merkez ve Ereğli ilçesinde *Hypnum cupressiforme* türünde HPLC-UV kullanılarak yapılan çalışmada PAH değişimleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda toplam PAH konsantrasyon değerleri Zonguldak merkezde 78.1-1693.5 ng/g, Ereğli ilçesinde ise 15.2-275.1 ng/g olarak tespit edilmiştir (Çabuk ve ark., 2014). Zonguldak'ta termik santrallerin olduğu Çatalağzı bölgesinde yapılan çalışmada ise 53.7-1707.9 ng/g aralığında tespit edilmiştir (Ören ve ark., 2021).

Diğer bir çalışmada ise iki yaygın tür olan *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp. ve *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. hava izleme çalışmaları için tercih edilmektedir. Ayrıca son yapılan çalışmalardan birinde *Isothecium stoloniferum* (Brid.) Grout da yaygın kullanılan türlerden birisi olmuştur (Cowden ve Aherne, 2019). Toksik elementler arasında yer alan Kadmiyum (Cd), Krom (Cr), Nikel (Ni), Arsenik (As), Kobalt (Co), Bakır (Cu), Çinko (Zn), Civa (Hg) ve Kurşun (Pb) gibi elementler önemli kirleticiler arasında yer almaktadır. Dolaylı yollardan besin zincirine kadar ulaşabilmektedir. *Hypnum cupressiforme* ile birlikte *Bryum*

argenteum, *Pottia truncata*, *Dicranella heteromalla* ve *Marchantia polymorpha* türlerinde yüksek konsantrasyonlarda Cr, Cd ve Zn birikim yaptığı bildirilmiştir (Singh ve ark. 2020; Zinicovscaia ve ark., 2021; Batan ve ark., 2012, 2021; Çiçekliyurt ve Yayıntaş, 2022). Uyar ve arkadaşları tarafından *H. cupressiforme* ve *P. purum* türleri ile yapılan farklı bir çalışmada ise yedi elementin kirlilik değerleri belirlenmiş ve ağır metal birikim oranları yüksek olandan düşük olana olacak şekilde (Fe, Pb, Cr, Ni, Cu, Co, As) sıralanmıştır (Uyar ve ark., 2008).

Birinci yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiş olan bu çalışmada, Kocaeli ilinde iz elementlerin ve PAH'ların atmosferik birikim değerleri, belirlenen iki farklı karayosunu türü *H. cupressiforme* ve *P. purum* kullanılarak araştırma yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Araştırma alanı

Bu çalışma, ülkemizin önemli geçiş yolu üzerinde bulunan, limanlar, havalimanı, son yıllarda artan sanayileşme ile birlikte devlet demiryolları, D100 karayolu ve TEM otoyolunu barındıran Kocaeli ilinde yapılmıştır. Kocaeli ili bölge olarak Marmara Bölgesi'nde yer almaktadır (Şekil 1-). İzmit Körfezi'nin kuzeyindeki büyük bir alanda konumlanan il, güneyden kuzeye doğru eğimli yapıda olup az engebeli bir alana sahiptir. Ayrıca Türkiye'nin nüfus yoğunluğu en fazla olan ili İstanbul'a yakınlığı, limanı ve farklı ulaşım imkanlarına sahip olduğu için önemli bir cazibe merkezi olmuştur. TÜİK 2024 verilerine göre il nüfusu 2.130.006 kişi olarak kayda geçmiştir (URL 1). Tüm bu önemli özelliklerinden dolayı ildeki nüfus artmıştır. Nüfustaki bu artış da kirliliğin artmasına sebep olmuştur.



Şekil 1. Kocaeli il haritası ve Kocaeli ilinden bir görünüm.

	29.63403			29.95611			29.57691	
12	40.78775 29.56489	155 m	30	40.94296 29.83577	315 m	48	40.81121 29.70632	460 m
13	40.80796 29.55957	285 m	31	40.85627 29.85603	450 m	49	40.81341 29.59795	290 m
14	40.80211 29.53476	40 m	32	40.87756 29.80736	370 m	50	40.83925 29.63695	325 m
15	40.77705 29.56200	150 m	33	40.92337 29.74205	260 m	51	40.78241 29.71110	130 m
16	40.83738 29.53717	225 m	34	40.92320 29.64316	390 m	52	40.78526 29.48236	130 m
17	40.84589 29.50610	150 m	35	40.89719 29.64316	360 m			
18	40.87821 29.46601	240 m	36	40.89863 29.73676	360 m			



Şekil 3. A) *Hypnum cupressiforme*, B) *Pseudoscleropodium purum*

Arazi çalışması tamamlandıktan sonra her iki türünde uygun koşullarda plastik torbalarda saklanıp laboratuvara getirilmesi sağlanmıştır.

2.3. Örneklerin analizler için hazırlanması

Laboratuvara getirilen örnekler toprak, taş, toz, farklı bitki kısımları gibi yabancı maddelerden arındırılarak, laboratuvar koşullarında kurutulmuştur. Kurutulduktan sonra PAH ve iz element analizlerinin yapılabilmesi için örneklerin yeşil kısımları öğütme cihazı ile öğütülerek analizler yapılana kadar +4 °C’ de soğutucuda saklanmıştır.

2.4. PAH analizi

Türlerin PAH ekstraksiyonları ve kromatografik analizlerinin yapılması literatürde yer alan yöntemlere göre tamamlanmıştır (Çabuk ve ark., 2014). Öğütülerek hazırlanan örneklerden 3'er g tartılarak 500 mL'lik erlenlere alınmıştır. Daha sonra PAH'lar ultrasonik banyo için 200 mL diklorometan ile 30 dakika ekstrakte edilip organik faza alınmıştır. Bu faz vakum altında 1 mL kadar kalıncaya kadar uçurulma işlemi uygulanmıştır. Ekstraksiyon esnasında PAH'larla birlikte organik çözücüye geçmesi muhtemel farklı organik maddelerin önlenmesi için kromatografik analiz

yapılmadan önce kolon kromatografisi tekniği kullanılmıştır. Cam kolonun dip kısmına cam pamuğu yerleştirildikten sonra üzerine hava kabarcığı oluşturmeyecek şekilde 2 g silika jel doldurulmuştur. Sabit fazın şartlandırılması için kolondan 30 mL *n*-pentan:diklorometan (DCM) geçirilerek kullanıma uygun hale getirilmiştir. Daha sonra uçurma işlemi tamamlanmış, 1 mL'lik kısım kolona yüklenmiş ve PAH'lar 20 mL *n*-pentan: DCM (1:1) çözücü karışımı ile geri kazanımı sağlanmıştır.

Vakum altında PAH'ları içeren organik faz yaklaşık 1 mL kalıncaya kadar uçurulmuştur. İşlem sonunda kalan çözücü, azot gazı (N₂) altında kuruluk sağlanana kadar uçurulmuştur (Akyüz ve Çabuk, 2009). Tüm örnekler analizler tamamlanana kadar +4 °C’ de soğutucuda muhafaza edilmiştir.

2.5. İz element analizi

İz element analizleri için uygun ortam şartlarında saklanan karayosunu örneklerine analiz öncesinde mikrodalga ile çözünürleştirme işlemi yapılmıştır. Bu işlem için örnekler mikrodalga'nın kuru ve temiz teflon parçalama haznelerine konulmuştur. Daha sonra örnekler üzerine 2 mL hidrojen peroksit (H₂O₂) ve 7 mL nitrik asit (konsantre HNO₃) ilave

edilerek parçalama işlemi tamamlanmıştır. Parçalanan örnekler deiyonize su ile 10 mL'ye seyreltilmiştir. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (ARTMER) örneklerin iz element analizleri yapılmıştır. Karayosunu örneklerindeki eser element (Al, As, Mo, Co, V, Cu, Fe, Zn, Cd, Sn, Hg, Pb, Cr, Ni, Sb) birikimlerinin ölçümü için ICP-MS-Perkin Elmer NexION 300D cihazı tercih edilmiştir. Kalibrasyon işlemi de liken referans materyali BCR 482 tercih edilmiştir.

2.6. İstatistik

Çalışma sonuçlarının istatistiksel analizinde SPSS 19 paket programından yararlanılmıştır ve sonuçların

karşılaştırılmasında ise korelasyon analizi, *t*-testi yapılmıştır.

3. Tartışma ve Sonuç

Çalışma alanından 52 noktadan toplanan *H. cupressiforme* türüne ait iz element birikim değerlerine ait veriler Tablo 2 ve Tablo 3'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ortalama birikim miktarları en yüksek 4639.87 µg/g ile Al, en az birikim ise 0.36 µg/g ile Cd'a ait olduğu bulunmuştur. Analizleri yapılan iz elementlerin ortalama birikim değerlerine göre bir sıralama yapıldığında miktarları; Al, Fe, Zn, Cu, Cr, Pb, Ni, V, Sn, Co, Mo, As, Sb, Hg, Cd şeklindedir.

Tablo 2. *H. cupressiforme* örneğindeki ağır metal birikimlerine ait istatistiksel veriler.

ppm (mg/kg kuru ağırlık)	N	Ortalama± Standart sapma	Medyan	Minimum	Maksimum
Al	52	4639.87±3214.23	3766.32	1090.22	16980.59
As	52	0.84±0.93	0.45	0.12	5.21
Co	52	2.04±1.40	1.58	0.30	6.19
Cu	52	18.90±19.50	14.01	4.05	136.20
Zn	52	56.01±56.51	28.20	10.39	281.22
Mo	52	0.96±0.63	0.84	0.23	3.88
Cd	52	0.36±0.29	0.28	0.11	1.87
Sn	52	2.19±1.43	1.74	0.02	6.11
Hg	52	0.42±0.43	0.26	0.10	2.12
Pb	52	13.18±10.36	9.40	2.64	44.30
Cr	52	17.09±12.54	13.00	3.83	61.78
Fe	52	3379.77±2097.01	2912.17	127.29	9029.18
Ni	52	9.27±5.98	7.31	3.20	29.88
V	52	8.79±7.83	6.03	1.67	35.34
Sb	52	0.51±0.88	0.31	0.08	6.50

Tablo 3. *H. cupressiforme* örneklerinde ağır metal birikim değerleri arasındaki korelasyon katsayıları.

	Al	As	Co	Cu	Zn	Mo	Cd	Sn	Hg	Pb	Cr	Fe	Ni	V	Sb
Al	1.00														
As	0.76**	1.00													
Co	0.73**	0.65**	1.00												
Cu	0.57**	0.43**	0.67**	1.00											
Zn	0.48**	0.45**	0.45**	0.76**	1.00										
Mo	0.66**	0.44**	0.79**	0.89**	0.59**	1.00									
Cd	0.45**	0.33*	0.53**	0.50**	0.63**	0.55**	1.00								
Sn	-0.04	-0.11	-0.12	-0.16	-0.31*	0.07	-0.11	1.00							
Hg	-0.11	-0.09	0.03	-0.13	-0.20	-0.09	-0.09	-0.30*	1.00						
Pb	0.65**	0.58**	0.75**	0.77**	0.70**	0.81**	0.75**	-0.18	-0.11	1.00					
Cr	0.78**	0.69**	0.75**	0.74**	0.61**	0.85**	0.58**	0.12	-0.23	0.75**	1.00				
Fe	0.61**	0.57**	0.64**	0.50**	0.33*	0.61**	0.57**	0.12	-0.12	0.63**	0.75**	1.00			
Ni	0.71**	0.73**	0.67**	0.60**	0.57**	0.67**	0.51**	0.16	-0.18	0.58**	0.88**	0.68**	1.00		
V	0.77**	0.85**	0.64**	0.42**	0.45**	0.52**	0.57**	0.072	-0.15	0.61**	0.81**	0.73**	0.89**	1.00	
Sb	0.45**	0.37**	0.57**	0.93**	0.63**	0.80**	0.38**	-0.08	-0.05	0.60**	0.62**	0.40**	0.56**	0.34*	1.00

İz elementlerin birbiriyle ilişkili olanları yıldız (*) işaretiyle gösterilmiştir. Sn ve Hg metalleri hariç diğer metallerin kendi aralarında pozitif bir ilişki olduğu görülmektedir. Kalayın sadece Hg ve Zn, Civanın ise sadece Sn ile aralarında istatistiksel olarak negatif yönde bir ilişki bulunmuştur (Tablo 3). Aralarında pozitif korelasyon olan elementlerin, birlikte hareket ettiği ve benzer kirletici kaynaklardan geliyor olabileceği söylenebilir.

Analizler sonucunda *H. cupressiforme* için PAH bileşikleri arasında PHE (60.98 ng/g), BkF (22.60 ng/g), FLT (18.18 ng/g) değerleri en yüksek bileşiklerdir iken ANT (3.47 ng/g), BaP (4.13 ng/g), IcdP (7.32) değerleri en düşük bileşiklerdir. Sonuçlar incelendiğinde, PAH değerlerine ait standart sapma değerlerinin aritmetik ortalama değerlerinden düşük olduğu gözlenmiştir. Ortanca ve aritmetik ortalama değerleri birbirine yakın

olduğunda, PAH değerleri normal dağılım göstermektedir (Akyüz ve Çabuk, 2009). Kocaeli ilinde belirlenen 52 noktadan toplanan *H. cupressiforme* örneklerindeki toplam PAH konsantrasyonu ortalamasının 193.94 ng/g olduğu Tablo 4.'te verilmiştir.

Korelasyon analizi sonuçlarına göre Kocaeli örneklerindeki birikim değerleri açısından PAH bileşikler arasında kuvvetli ilişkiler ($p<0.01$) görülmektedir (Tablo 5). Sonuçlar yorumlandığında ise ortaya çıkan bu ilişkiler kirletici kaynaklarının benzer olabileceğini göstermektedir.

Tablo 4. *H. cupressiforme* örneğindeki PAH konsantrasyonlarına ait istatistiksel veriler.

PAH (ng/g kuru ağırlık)	N	Ortalama $\pm$ Standart sapma	Medyan	Minimum	Maksimum
PHE	52	60.98 $\pm$ 38.22	51.23	12.91	188.53
ANT	52	3.47 $\pm$ 5.52	1.78	0.34	33.25
PYR	52	13.66 $\pm$ 9.67	11.80	3.57	62.82
FLT	52	18.18 $\pm$ 16.27	14.85	3.45	111.97
BaA	52	9.45 $\pm$ 8.81	7.68	1.58	61.19
CHY	52	10.46 $\pm$ 7.44	8.99	1.91	35.55
BbF	52	16.81 $\pm$ 14.30	12.48	4.90	86.45
BkF	52	22.60 $\pm$ 17.31	16.04	5.90	102.54
BaP	50	4.13 $\pm$ 2.93	3.43	1.13	18.47
DahA	52	13.08 $\pm$ 9.86	10.25	4.26	57.55
IcdP	44	7.32 $\pm$ 6.97	4.77	1.24	35.62
BghiP	52	15.98 $\pm$ 11.56	11.52	3.14	51.06
Σ PAH	52	193.94 $\pm$ 110.58	167.88	67.15	724.21

Tablo 5. *H. cupressiforme* örneklerindeki PAH'lar arası korelasyon katsayıları.

	PHE	ANT	PYR	FLT	BaA	CHY	BbF	BkF	BaP	DahA	IcdP	BghiP	TPAH
PHE	1.00												
ANT	0.43**	1.00											
PYR	0.35**	0.35**	1.00										
FLT	0.38**	0.43**	0.86**	1.00									
BaA	0.28*	0.47**	0.73**	0.78**	1.00								
CHY	0.27*	0.18	0.48**	0.65**	0.56**	1.00							
BbF	0.31*	0.42**	0.70**	0.72**	0.78**	0.51**	1.00						
BkF	0.30*	0.38**	0.62**	0.63**	0.72**	0.42**	0.91**	1.00					
BaP	0.26	0.22	0.29*	0.35*	0.23	0.57**	0.49**	0.46**	1.00				
DahA	0.29	0.39**	0.46**	0.50**	0.46**	0.52**	0.66**	0.53**	0.75**	1.00			
IcdP	0.30*	0.33*	0.50**	0.54**	0.56**	0.45**	0.67**	0.63**	0.39**	0.68**	1.00		
BghiP	0.35**	0.34*	0.43**	0.48**	0.57**	0.40**	0.75**	0.73**	0.42**	0.64**	0.85**	1.000	
TPAH	0.68**	0.56**	0.76**	0.81**	0.77**	0.62**	0.86**	0.81**	0.54**	0.70**	0.73**	0.76**	1.00

Avrupa'da karayosunları ile yapılan çalışmalarda kentsel ve endüstriyel alanlarda, kırsala göre PAH konsantrasyonlarının daha yüksek çıktığı bulunmuştur (Holoubek ve ark., 2000; Viskari, 2000; Orlinski, 2002; Ötvös ve ark., 2004; Galuszka, 2007; Migaszewski et al. 2009.). PAH konsantrasyonları çalışılan bölgelere göre farklılık göstermektedir. Bunun nedeni çalışma yapılan alanların iklimsel özelliklerinin, coğrafik yapısının, taşıt yoğunluğunun, endüstriyel faaliyetlerin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Arazide 22 noktadan birlikte toplanan *H. cupressiforme* ve *P. purum* türlerinin birikim değerleri karşılaştırıldığında Al ve Fe elementlerinin birikimlerinin her iki tür içinde ilk iki sırayı aldığı görülmektedir (Tablo 6). Kalay dışındaki elementlerin ortalama birikim değerleri açısından türler arasında istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu görülmektedir ($p<0.01$). Ağır metal değerleri incelendiğinde *H. cupressiforme* türünde

en fazla birikim yapan alüminyum 4421.78 $\mu\text{g/g}$ olurken ikinci sırada 3145.74 $\mu\text{g/g}$ ile demir yer almaktadır. İki tür birbiriyle karşılaştırıldığında ise *H. cupressiforme* de birikimlerin daha yüksek olduğu söylenebilir. *H. cupressiforme* en düşük konsantrasyona sahip kadmiyumu 0.27 $\mu\text{g/g}$ olarak biriktirirken, *P. purum* ise civayı 0.05 $\mu\text{g/g}$ olarak bünyesinde biriktirmiştir.

Kocaeli ilinde 2012 yılında biyomonitör liken türü kullanılarak yapılan çalışmada bölgedeki ağır metal birikim değerleri araştırılmıştır. Çalışmada Kadmiyum, Mangan, Krom, Bakır, Nikel, Kurşun ve Çinko elementlerinin atmosferik birikim değerleri çalışılmıştır. Dilovası ilçesinin en yoğun kirliliğe sahip alan olduğu görülmüştür. Çinko (Zn) değeri 967.33 ppm olarak bulunmuştur. Ayrıca Pb ve Cd değerleri, temiz alanlara göre 3-5.8 kat farklı ölçülmüştür. Bu bölgedeki sanayinin yoğunluğu, kirliliğin sebebi olarak gösterilmiştir (Demiray ve ark., 2012). İki türün 22 noktadan alınarak elde

edilen PAH konsantrasyonlarına ait değerler Tablo 7’de verilmiştir. Ortalama TPAH konsantrasyonları *H. cupressiforme*’de 175.12 iken *P. purum*’da 91.17 olarak bulunmuştur. Analiz edilen PAH bileşiklerinin ortalamalarının BaA ve BaP hariç

diğer bileşikler açısından istatistiksel olarak farklı olduğu bulunmuştur ($p<0.05$) ve *H. cupressiforme*’nin PAH bileşiklerini daha yüksek oranda biriktirdiği görülmektedir.

Tablo 6. İki türün ağır metal birikim değerlerinin karşılaştırılması

<i>H. cupressiforme</i> (µg/g)					<i>P. purum</i> (µg/g)			
	N	Ortalama	Std Sapma	Değer aralığı	Ortalama	Std. Sapma	Değer aralığı	t testi
<i>Al</i>	22	4421.78	3361.52	1306.7-16980.5	794.34	792.65	136.59-3310.46	4.81**
<i>As</i>	22	0.62	0.74	0.13-3.61	0.1	0.12	0-0.63	3.21**
<i>Co</i>	22	1.85	1.41	0.3-5.14	0.33	0.29	0.007-1.26	4.86**
<i>Cu</i>	22	13.55	9.24	4.05-42.76	3.72	1.75	1.08-7.35	4.78**
<i>Zn</i>	22	38.3	34.16	11.12-124.34	11.48	7.73	0.07-27.53	3.51**
<i>Mo</i>	22	0.81	0.47	0.23-2.19	0.32	0.15	0.18-0.88	4.54**
<i>Cd</i>	22	0.27	0.16	0.12-0.87	0.12	0.09	0.02-0.43	3.80**
<i>Sn</i>	22	2.2	1.49	0.02-6.11	1.94	0.98	0.8-4.18	0.66
<i>Hg</i>	22	0.49	0.49	0.1-1.56	0.05	0.02	0.03-0.11	4.15**
<i>Pb</i>	22	9.17	7.63	2.64-39.61	2.36	1.39	0.66-6.88	4.01**
<i>Cr</i>	22	13.98	10.2	3.83-47	4.82	4.05	1.61-20.82	3.82**
<i>Fe</i>	22	3145.74	2089.78	127.29-8404.13	693.88	664.45	136.69-2978.79	5.12**
<i>Ni</i>	22	7.77	4.28	3.2-19.81	2.85	1.91	1.27-9.01	4.81**
<i>V</i>	22	6.8	5.79	1.67-25.3	1.51	1.29	0.27-5.03	4.09**
<i>Sb</i>	22	0.32	0.19	0.08-0.72	0.07	0.03	0.01-0.14	5.85**

Tablo 7. İki türün PAH konsantrasyon değerlerinin karşılaştırılması.

<i>H. cupressiforme</i> (µg/g)					<i>P. purum</i> (µg/g)			
	N	Ortalama	Std. Sapma	Değer aralığı	Ortalama	Std. Sapma	Değer aralığı	t testi
PHE	22	54.48	30.71	1589-153.22	29.41	18.68	9.26-97.72	3.19*
ANT	22	2.39	1.81	0.34-8.27	1.2	1.23	0.17-5.72	2.50*
PYR	22	13.7	6.8	3.57-25.24	6.64	6.6	1.45-28.82	3.27*
FLT	22	16.36	8.43	3.65-30.13	10.2	10.79	2.55-51.14	2.01*
BaA	22	8.28	3.85	1.58-14.27	4.61	2	2.03-9.95	3.88
CHY	22	8.91	4.03	1.91-15.63	6.97	3.84	1.35-15.09	1.59*
BbF	22	15.96	8.85	5.11-41.99	6.93	4.93	1.17-20.11	4.08*
BkF	22	20.31	10.21	8.03-47.58	9.04	5.6	1.84-19.58	4.43*
BaP	21	4.04	2.05	1.36-9.13	1.53	0.5	0.96-3.21	5.08
DahA	19	12.49	7.72	5.32-36.87	7.86	5.2	3.95-24.21	1.76*
IcdP	22	6.4	6.74	2.01-35.62	4.19	3.9	1.12-13.01	1.29*
BghiP	22	13.69	7.97	3.14-42.5	8.2	7.82	1.69-40.08	2.25*
TPAH	22	175.12	66.71	67.66-331.36	91.17	55.04	23.05-256.75	4.44*

* Korelasyon 0.05 düzeyinde anlamlı.

Tayvan’da yapılan bir çalışmada toplam PAH miktarının fazla çıkmasının en önemli etkenleri arasında o bölgede araç trafiğinin yoğunluğu olduğu belirtilmiştir (Fang ve ark., 2004). İzmir’de yapılan diğer bir çalışmada ise kırsal ve kentsel alanlardan örnekleme yapılarak on dört PAH türü incelenmiş ve BaA(BaA+CHY) oranı 0.35’ten daha düşük bulunmuş ve sebebi trafikten kaynaklı yoğun emisyon olarak verilmiştir (Demircioğlu ve ark., 2011). Hong ve arkadaşlarının çalışmasında her mevsimde dört farklı bölgeden örnekler toplanmış ve 15 PAH’ın analizi yapılmıştır. Bunlar arasında en fazla kış mevsiminde 32.6 ng/m³ olarak birikim yapıldığı gözlenmiştir. Fenantren, piren, floranten ve krisen her mevsimde birikimleri gözlenirken,

kaynak olarak motorlu araçlar ve endüstri emisyonlarının neden olduğu gösterilmiştir (Hong ve ark., 2007).

Çalışma sonuçlarına göre toplam PAH konsantrasyonları 300 ng/g’dan büyük olan noktalar sanayileşmenin yoğun olduğu Dilovası bölgesinde yer alırken, 100 ng/g’dan küçük olan noktalar ise kırsal ya da kırsala yakın olan sanayinin ve nüfusun az olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Ağır metallerin birikimlerinde de benzer sonuçlar görülmektedir. Kocaeli örneklerinde PAH ve ağır metal bileşiklerinin aralarında yüksek korelasyon olması kaynaklarının benzer olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar alanda biyomonitör

likenler kullanılarak yapılan çalışmanın sonuçları örtüşmekte olup atmosferik kirleticilerin birikimlerinin yüksek olduğu bölge Dilovası olarak tespit edilmiştir (Demiray ve ark., 2012).

Deklarasyon

Yazar katkıları: Fikir/Kavram, MÖ, HÇ, GK; Tasarım ve dizayn, GK, MÖ, HÇ; Denetleme danışmanlık, MÖ, HÇ, GK; Kaynaklar, GK, MÖ, HÇ; Malzemeler, GK, MÖ, HÇ; Veri toplama ve/veya işleme, GK, MÖ, HÇ; Analiz ve/veya yorum, GK, MÖ, HÇ; Literatür taraması, GK, MÖ, HÇ; Yazım aşaması, GK, MÖ, HÇ; Eleştirel inceleme, GK, MÖ, HÇ.

Çıkar çatışması: Yazarların bu yazının içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir rekabet çıkarı yoktur.

Finansman: Birinci yazarın yüksek lisans tezinden üretilen bu çalışma Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2015-84906727-03 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Etik onay: Bu araştırma, insan veya hayvan deneklerini içermemektedir ve bu nedenle etik onay gerektirmemektedir.

Not: Çalışma verileri 11-15 Mayıs 2017 tarihlerinde Kayseri’de düzenlenen Uluslararası Ekoloji Sempozyumunda ve 26-27 Nisan 2018 tarihlerinde Ankara’da düzenlenen Uluslararası Avrasya Biyolojik ve Kimyasal Bilimler Konferansında sözlü bildiri olarak sunulmuş ve kongre özet kitabında özet bildiri olarak basılmıştır.

Kaynaklar

- Aizezi N. Ye Y. Chen Z. Liu Y. 2025. Impact of soldering temperatures on heavy metal and dust emissions: A LIBS-based environmental pollution analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 107124.
- Akyüz M. Çabuk H. 2009. Meteorological Variations of PM_{2.5}/PM₁₀ Concentrations and Particle-Associated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in The Atmospheric Environment of Zonguldak, Turkey. *Journal of Hazardous Materials*. 170:1, 13-21.
- Arndt J. Planer-Friedrich B. 2018. Moss bag monitoring as screening technique to estimate the relevance of methylated arsine emission. *Science of the Total Environment*. 610, 1590-1594.
- Batan N. Özdemir T. Mendil D. 2012. Determination of Heavy Metal Concentration of Mosses in Degirmendere

- Valley of Trabzon Province of Turkey. *Asian Journal of Chemistry*. 24:1, 193-196.
- Batan N. Özdemir T. Saralioğlu E. Akçay N. Mendil D. 2021. Determination of Heavy Metal Levels in Some Moss Samples Collected from Near the Highways in Burdur Province. *Anatolian Bryology*. 7:1, 33-43.
- Barbosa J. F. Rocha B.A. Souza M.C. Bocato M.Z. Azevedo L.F. Adeyemi J.A. Santana A. Campiglia A. D. 2023. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): updated aspects of their determination, kinetics in the human body, and toxicity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 26:1, 28-65.
- Behrooz R. D. Gkaras S. K. Kaskaoutis D. G. 2025. Atmospheric heavy metals and human health. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 100607.
- Cowden P. Aherne J. 2019. Interspecies comparison of three moss species (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, and *Isoetes macrospora*) as biomonitors of trace element deposition. *Environmental Monitoring and Assessment*. 191: 1-13.
- Çabuk H. Kılıç M.S. & Ören M. 2014. Biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban and industrial environments of the Western Black Sea Region, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*. 186, 1515-1524.
- Çiçekliyurt M. M. H. Yayintas O. T. 2022. DNA methylation in bryophytes as a biomarker for monitoring environmental pollution. *Indian Journal of Experimental Biology (IJEB)*. 60:11, 870-874.
- Demiray A. D. Yolcubal I. Akyol N. H. Çobanoğlu G. 2012. Biomonitoring of airborne metals using the Lichen *Xanthoria parietina* in Kocaeli Province, Turkey. *Ecological indicators*. 18: 632-643.
- Demircioglu E. Sofuoglu A. Odabasi M. 2011. Atmospheric concentrations and phase partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in Izmir, Turkey. *CLEAN–Soil, Air, Water*. 39:4, 319-327.
- Demková L. Baranová B. Oboňa J. Árvay J. & Lošák T. 2017. Assessment of air pollution by toxic elements on petrol stations using moss and lichen bag technique. 8, 355-361.
- Dhara A. Dutta R. 2025. A review on sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wetland ecosystem: focusing on plant-biomonitoring and phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*. 1-23.

- Fang G. C. Wu Y. S. Fu P. P. C. Yang I. L. Chen M. H. 2004. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of suburban and industrial regions of central Taiwan. *Chemosphere*. 54:4, 443-452.
- Gałaszka A. 2007. Distribution patterns of PAHs and trace elements in mosses *Hylocomium splendens* (Hedw.) BSG and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. from different forest communities: a case study, south-central Poland. *Chemosphere*. 67:7, 1415-1422.
- Gezahegn A. Bohnett E. Mammo S. 2024. The role of mosses in 'clean and green' phytoremediation technology: a review paper. *BioMetals*. 1-13.
- Gómez-Enastegui C. Avila-Pérez P. García-Rivas J.L. Barrera-Díaz C.E. Ortiz-Oliveros H.B. & Martínez-Gallegos S. 2025. Evaluation of an aquatic liverwort and terrestrial moss as biomonitors of heavy metals associated with particulate matter. *Scientific Reports*. 15:1, 4127.
- Goodman G.T. Roberts T.M. 1971. Plants and soils as indicators of metals in the air. *Nature*. 231:5301, 287-292.
- Han Y. Kou J. Jiang B. Li J. Liu C. Lei S. Xiao H. Feng, C. 2025. Bryophytes adapt to open-pit coal mine environments by changing their functional traits in response to heavy metal-induced soil environmental changes-*Journal of Hazardous Materials*. 482, 136613.
- Jomova K. Alomar S. Y. Nepovimova E. Kuca K. Valko M. 2025. Heavy metals: toxicity and human health effects. *Archives of Toxicology*. 99:1, 153-209.
- Keith, L. H. (2015). The source of US EPA's sixteen PAH priority pollutants. *Polycyclic Aromatic Compounds*. 35:2-4, 147-160.
- Macedo-Miranda M.G. Barrera-Díaz C.E. Avila-Pérez P. López-Solórzano E. Ortiz-Oliveros H.B. & Zavala-Arce R.E. 2024. Bioconcentration capacity of moss *Leskea angustata* Tayl., for heavy metals and its application in the atmospheric biomonitoring of a metropolitan area. *Atmospheric Environment*. 331, 120579.
- Macklin M. G. Thomas C. J. Mudhatkal A. Brewer P. A. Hudson-Edwards K. A. Lewin J. Scussolini P. Eilander D. Lechner A. Mangalaa K. R. Owen J. Kuş G. Kemp D. 2023. Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. *Science*. 381:6664, 1345-1350.
- Mitra S. Chakraborty A. J. Tareq A. M. Emran T. B. Nainu F. Khusro A. Idris A. M. Khandaker M. U. Osman H. Alhumaydhi F. A. Simal-Gandara, İ. 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University-Science*. 34:3, 101865.
- Molnar E. Odagiu A. Balint C. Burduhos P. Iederan C. Braşovean I. & Malnas C. 2024. Testing Biomonitoring Potential of Bryophytes. Note II: The Interrelations Between the Heavy Metal Content Identified in the Soil of Different Areas of Harghita County. *ProEnvironment Promediu*. 17:60, 208-214.
- Montano L. Baldini G. M. Piscopo M. Liguori G. Lombardi R. Ricciardi M. Esposito G. Pinto G. Fontanarosa C. Spinelli M. Palmieri I. Sofia D. Brogna C. Carati C. Esposito M. Gallo P. Amoresano A. Motta O. 2025. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Environment: Occupational Exposure, Health Risks and Fertility Implications. *Toxics*. 13:3, 151.
- Oishi Y. (2022). Biomonitoring of transboundary pollutants using moss in Japan's mountains. *Environmental Science and Pollution Research*. 29:10, 15018-15025.
- Orliński R. 2002. Multipoint moss passive samplers assessment of urban airborne polycyclic aromatic hydrocarbons: concentrations profile and distribution along Warsaw main streets. *Chemosphere*. 48:2, 181-186.
- Ötvös E. Kozák I. O. Fekete J. Sharma V. K. Tuba Z. 2004. Atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in mosses (*Hypnum cupressiforme*) in Hungary. *Science of the Total Environment*. 330:1-3, 89-99.
- Ören M. Koçak G. & Çabuk H. 2021. Zonguldak Çatalağzı Bölgesinde Bazı Atmosferik Polisiklik Aromatik Hidrokarbonların ve İz Elementlerin Karayosunları Kullanılarak Araştırılması. *Anatolian Bryology*. 7:1, 44-52.
- Öztürk M.Z. Çetinkaya G. Aydın S. 2017. Köppen-Geiger iklim sınıflandırmasına göre Türkiye'nin iklim tipleri. *Coğrafya Dergisi*, 35: 17-27.
- Radić S. Stipaničev D. Cvjetko P. Rajčić M.M. Širac S. Pevallek-Kozlina B. & Pavlica M. 2011. Duckweed *Lemna minor* as a tool for testing toxicity and genotoxicity of surface waters. *Ecotoxicology and environmental safety*. 74:2, 182-187.
- Rezania S. Taib S.M. Din M.F.M. Dahalan F.A. Kamyab H. 2016. Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of hazardous materials*. 318: 587-599.
- Rice K. M. Walker Jr E. M. Wu M. Gillette C. Blough E. R. 2014. Environmental mercury

- and its toxic effects. Journal of preventive medicine and public health. 47:2, 74.
- Salo M. Hiedanpää J. Karlsson T. Ávila L.C. Kotilainen J. Jounela P. García R.R. 2016. Local perspectives on the formalization of artisanal and small-scale mining in the Madre de Dios gold fields, Peru. The Extractive Industries and Society. 3:4, 1058-1066.
- Singh R. Joshi H. Singh A. 2020. Bryophytes: Natural Biomonitor. In Natural Products Chemistry. Apple Academic Press. 139-153.
- Suresh A. Soman V. KR, A. Rahman K. H. 2025. Sources, toxicity, fate and transport of polyaromatic hydrocarbons (PAHs) in the aquatic environment: A Review. Environmental Forensics. 26:1, 35-57.
- URL 1. Türkiye İstatistik Kurumu. Website: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2024-5378> [Retrieved: 29.04.2025].
- URL 2. Google Haritalar [Harita]. Website: <https://www.google.com.tr/maps> [Retrieved: 25. 04.2016].
- Uyar G. Ören M. İnce M. 2007. Atmospheric Heavy Metal Deposition in Düzce Province by Using Mosses as Biomonitor. Fresenius Environmental Bulletin. 16:2, 145-153.
- Uyar G. Ören M. Yildirim Y. & Öncel S. 2008. Biomonitoring of metal deposition in the vicinity of Ereğli steel plant in Turkey. Environmental Forensics. 9:4, 350-363.
- Uyar G. Avcıl E. Ören M. Karaca F. Öncel M.S. 2009. Determination of Heavy Metal Pollution in Zonguldak, Turkey, by Moss Analysis (*Hypnum cupressiforme*). Environmental Engineering Science. 26:1, 183-194.
- Zinicovscaia I. Hramco C. Chaligava O. Yushin N. Grozdov D. Vergel K. Duca G. 2021. Accumulation of potentially toxic elements in mosses collected in the Republic of Moldova. Plants. 10:3, 471.
- Xu X. Liu X. Wang S. Zou Y. Zhang J. Liang L. Wen C. Li Y. Xu X. He X. Liu G. Xu, X. 2024. Relationship between PAH4 formation and thermal reaction products in model lipids and possible pathways of PAHs formation. Journal of Hazardous Materials. 465, 133374.