



Sedimentolojik Proksilere Göre Potansiyel Toksik Element Kaynaklı Ekolojik Risk Seviyesinin Analizi: Gölyazı Litoral Zonu (Uluabat Gölü – Bursa) Örneği
Analysis of Ecological Risk Levels Due to Potential Toxic Elements Based on Sedimentological Proxies: Gölyazı Littoral Zone (Uluabat Lake – Bursa) Example

Buse Öğreten¹, Ahmet Evren Erginal^{2*}, Şakir Fural³, Serkan Kükrer⁴, Erdal Öztura²

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü,
Coğrafya Eğitimi Anabilim Dalı, Çanakkale, Türkiye

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Coğrafya Eğitimi Bölümü, Çanakkale, Türkiye

³ Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen – Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Kırşehir, Türkiye

⁴ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi,
Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

• Geliş/Received: 11.07.2025 • Düzeltmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 01.10.2025 • Kabul/Accepted: 02.10.2025
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 14.11.2025 • Baskı/Printed: 31.01.2026

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Biyoçeşitlilik açısından oldukça önemli olan göl ekosistemlerinde son yıllarda hızla artan antropojenik faaliyetlerin yol açtığı degradasyonel değişimler dikkat çekmektedir. Göl ekosistemlerindeki ortam bozulmasında potansiyel toksik element (PTE) kontaminasyonunun rolü oldukça fazladır. Bu çalışma Türkiye'nin önemli sulak alanlarından biri olan Uluabat (Apolyont) Gölü'nde yer alan ve üzerinde Gölyazı yerleşmesinin yer aldığı tombolo kıyılarındaki ekolojik riske odaklanmıştır. Tombolo kıyısı boyunca göl tabanından alınan sediment örneklerinin organik karbon ve klorofil bozunma ürünleri analizleri yanı sıra ICP-MS ile belirlenen PTE değerlerinden zenginleşme faktörü (EF), kontaminasyon faktörü (CF), modifiye kontaminasyon faktörü (mCD), toksik risk indeksi (TRI), kirlilik yük indeksi (PLI), ekolojik risk indeksi (mER) ve potansiyel ekolojik risk indeksi (PER) hesaplamaları yapılmıştır. Elde edilen verilere göre; göl sedimentlerinde PTE konsantrasyonu açısından Fe (29.200) > Al (21.500) > Mn (962) > Ni (256) > Cr (101) > Zn (90) > As (39) > Pb (37) > Cu (31) > Co (20) şeklinde bir sıralanma söz konusudur. EF verilerine göre PTE'lerin zenginleşme düzeyi Ni (10,31) > As (8,24) > Pb (5,05) > Mn (3,12) > Cr (3,08) > Co (2,81) > Zn (2,58) > Fe (2,30) > Cu (1,88) şeklindedir. PTE kaynaklı ekolojik risk seviyesi Ni (51), Co (41), Pb (25), As (24), Cu (10) olup ortalama potansiyel ekolojik risk seviyesi 161'dir. Gölyazı yerleşmesi çevresindeki litoral zonda Cu hariç diğer tüm PTE'ler belirli miktarda zenginleşmiştir. Göldeki en riskli ekolojik risk kaynağı Ni olarak belirlenmiştir. Orta derecede ekolojik risk tespit edilen göldeki başlıca antropojenik risk kaynakları tarım, endüstri ve yerleşme atıklarıdır.

Anahtar Kelimeler: Ekolojik risk, göl ekolojisi, potansiyel toksik element kontaminasyonu, sedimentoloji, limnoloji, Uluabat Gölü.

Abstract: Degradational changes caused by rapidly increasing anthropogenic activities in recent years in lake ecosystems, which are crucial for biodiversity, have attracted attention. Potentially toxic element (PTE) contamination plays a significant role in environmental degradation in lake ecosystems. This study focused on the ecological risk along the tombolo shores of Lake Uluabat (Apolyont), one of Turkey's important wetlands, where

Gölyazı settlement is located. Sediment samples taken from the lake bottom along the tombolo shore were analysed for organic carbon and chlorophyll degradation products. Furthermore, the enrichment factor (EF), contamination factor (CF), modified contamination factor (mCD), toxic risk index (TRI), pollution load index (PLI), ecological risk index (mER), and potential ecological risk index (PER) were calculated using PTE values determined by ICP-MS. Based on the obtained data, the PTE concentration in lake sediments is in the following order: Fe (29200) > Al (21500) > Mn (962) > Ni (256) > Cr (101) > Zn (90) > As (39) > Pb (37) > Cu (31) > Co (20). According to EF data, the enrichment level of PTEs is Ni (10.31) > As (8.24) > Pb (5.05) > Mn (3.12) > Cr (3.08) > Co (2.81) > Zn (2.58) > Fe (2.30) > Cu (1.88). The ecological risk level from PTEs is Ni (51), Co (41), Pb (25), As (24), Cu (10) and the average potential ecological risk level is 161. In the littoral zone around Gölyazı settlement, all PTEs except Cu are enriched to a certain extent. Ni was identified as the ecological risk source with highest risk in the lake. The main anthropogenic risk sources in the lake, where a moderate ecological risk was identified, are agricultural, industrial, and settlement wastes.

Keywords: Ecological risk, lake ecology, potential toxic element contamination, sedimentology, limnology, Uluabat Lake.

GİRİŞ

Antropojenik etkiler ve litolojik kaynaklar ile zenginleşerek ekosistem ve insan sağlığına zarar verme riskine sahip metaller potansiyel toksik element (PTE) olarak tanımlanmaktadır. PTE'ler yerkabuğunu oluşturan temel bileşenler arasındadır ve doğal konsantrasyon seviyesinde olduklarında canlı yaşamı açısından önemlidir. Ancak, PTE'lerin antropojenik kaynaklar ve başta litolojik özellikler gibi doğal faktörler nedeniyle zenginleşmesi ekosistem üzerinde telafisi oldukça zor olan yıkımlara neden olmaktadır (Fural vd., 2020). İnsanların doğal çevreye verdiği zarar arttıkça potansiyel toksik element (PTE) kaynaklı ekolojik bozulma başta olmak üzere önemli düzeyde çevre sorunları ortaya çıkmaktadır. Bahsi geçen sorunlar doğal biyomların hızla bozulmasına neden olmaktadır.

Ekolojik risk bütün ekosistemleri etkileyen küresel ölçekli bir problemdir. Yapılan araştırmalar PTE'lerin antropojenik etkilerden uzak olduğu düşünülen derin okyanus (6–10 km derinlik) sedimentlerinde dahi yüksek konsantrasyon seviyesine ulaşabildiğini göstermiştir (Sanei vd., 2021). Bu durum, PTE kaynaklı ekolojik sorunların yayılış alanları ve ekolojik etki düzeylerinin boyutunu ortaya çıkarmaktadır.

Türkiye'nin içinde yer aldığı Akdeniz havzası, doğal ortam koşulları gereği su zengini

değildir (Fural vd., 2020). Su stresi çeken ve su kıtlığına doğru sürüklenen Türkiye'nin mevcut su kaynaklarını en iyi şekilde koruması gerekmektedir. Çünkü; antropojenik faaliyetlerden kaynaklanan çevre sorunları Türkiye'deki sulak alan sedimentlerinde dikkatle izlenmesi gereken düzeyde bir çevre sorunu haline gelmiştir (Kükrer vd., 2015, 2019; Uludağ vd., 2018; Fural vd., 2020, 2021; Aykır vd., 2023; Ustaoglu vd., 2022; Tekiner vd., 2025).

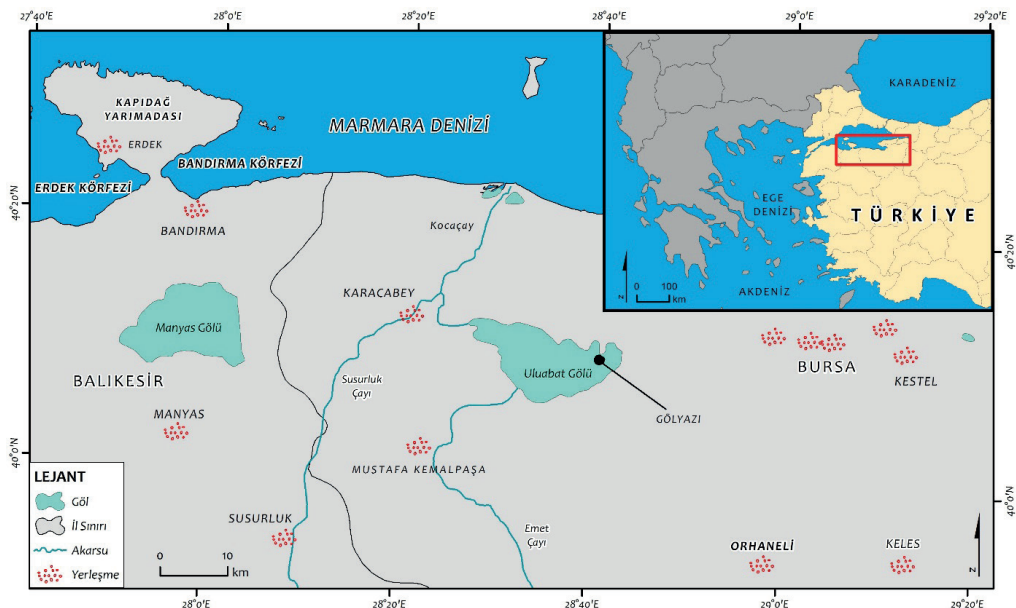
Güney Marmara'daki önemli göllerden biri olan Uluabat Gölü 1998 yılında Ramsar alanı olarak ilan edilmiş ve koruma altına alınmıştır (Hacısalıhoğlu ve Karaer, 2004). Fakat inceleme alanında yapılan geçmiş araştırmalar gölün PTE bakımından ekolojik riskler taşıdığını rapor etmiştir. Gölyazı kıyıları da dahil olmak üzere gölün 6 farklı kesiminden alınan örneklerde Pb, Cd, Zn ve Fe bakımından yüksek kontaminasyon seviyeleri belirlenmiştir (Barlas vd., 2005). Bunun yanında, göl suyundaki PTE'lerin (Cd, Cr, Pb, Cu, Ni ve Zn) gölde yaşayan baskın zoobentik türlerin bünyelerine geçtiğine dair kayıtlar (Arslan vd., 2010) bulunması Uluabat Gölü'ndeki ekolojik risk seviyesinin belirli periyotlar ile analiz edilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca gölün yakın çevresindeki akarsu havzalarında yapılan bilimsel çalışmalar doğal ve antropojenik kaynaklı PTE kontaminasyonuna dikkat çekmektedir (Aykol vd., 2003; Sarı, 2008).

Uluabat Gölü içindeki bir tombolo konumunda olan Gölyazı Köyü kıyılarında litoral zon sınırları içerisindeki PTE kaynaklı ekolojik risklerin izlenmesi kapsamında hazırlanan bu çalışmanın amacı; Uluabat Gölü'nün Gölyazı köyü kıyılarında sulak alanı tehdit eden PTE içeriklerinin yarattığı ekolojik risk seviyesini belirlemek ve tespit edilen sorunlar için çözüm önerileri sunmaktır.

Çalışma Sahasının Konumu ve Genel Coğrafi Özellikleri

Türkiye'nin yüzölçümü açısından 10. büyük gölü olan Uluabat Gölü tektonik kökenli bir tatlı su gölü olup, Bursa'nın Karacabey ilçesinde yer alır (Şekil 1). Gölün yüzölçümü yaklaşık 134 km², deniz seviyesinden yüksekliği 5 metre, derinliği ise ortalama 3, maksimum 4 metredir (Hoşgören, 1994). Doğu-batı yönde 23-24 km uzunluk ve kuzey-güney yönde 12 km kadar genişliğe sahip olan gölün ana besleyeni 10.414 km² drenaj alanına sahip olan Mustafakemalpaşa Çayı'dır. Mustafakemalpaşa Çayı göl tabanında 0,20 cm/yıl oranında sediment birikimine

neden olmaktadır (Kazancı vd., 2004). Yüksek sayılabilecek siltasyon düzeyi, iklimatik kuraklık ve antropojenik faktörlerden dolayı Uluabat Gölü'nün yüzey alanında son yıllarda daralma yaşanmaya başlanmıştır. Bu alan kaybının 1987 ve 2023 yılları arasında 12,60 km² (%6) olduğu belirlenmiştir (Kuşçu, 2024). Gölün çevresinin tarım arazilerinden oluşmasının yanı sıra sanayi ve evsel atıkların göldeki su ve sediment kalitesi üzerinde olumsuz etkileri büyüktür (Çelik, 2000). Özellikle Mustafakemalpaşa Çayı'nın göle ağır bir kirlilik yükü taşıdığı yapılan bilimsel çalışmalar ile tespit edilmiştir. Bahsi geçen çalışma kapsamında; askıda katı madde (AKM), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOI), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOI), amonyum azotu (NH₄-N), nitrat azotu (NO₃-N), toplam azot (TN), fosfat fosforu (PO₄-P) ve toplam fosfor (TP) parametreleri incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre Mustafakemalpaşa Çayı'nın yan kolu olan Akçalar Deresi'nin göle belirtilen miktarda kirlletici yükü taşıdığı (TN:19.6 ton/yıl; TP:0,3 ton/yıl; KOI:74 ton/yıl; BOI:50,5 ton/yıl; AKM:41,4 ton/yıl) belirlenmiştir (Hacısalıhoğlu ve Karaer, 2020).



Şekil 1. Araştırma sahasının konumu.
Figure 1. Location of the study area.

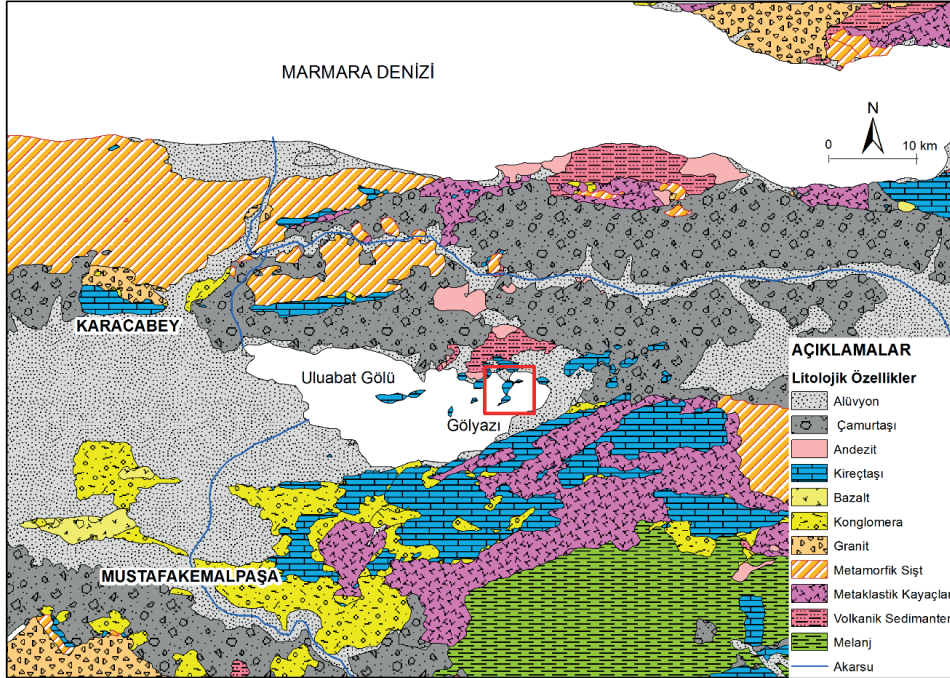
Yapısal jeoloji bakımından tektonik bir göl olan Uluabat Gölü'nün yakın çevresindeki jeolojik istif tabandan yukarıya doğru Paleozoyik yaşlı Serkedere metamorfikleri, Mesozoyik yaşlı bazik volkanikler, metadetritik radyolaritler, sıg deniz çökelleri ve kireçtaşlarından oluşan sedimanlar, kumtaşı, radyolarit ve çörtle birlikte bazik-ultrabazik kayaç grubu, daha sonra Senozoyik yaşlı Çataldağ graniti ile karasal çökellerden oluşmaktadır (Şekil 2). Uluabat Gölü Miyosen sonrası tektonik aktiviteye bağlı olarak çek-ayır havza tipindeki bir ortamda faylanmaya bağlı olarak oluşmuştur (Çelenli, 2000).

MATERYAL ve METOT

Sediment Örneklemesi

Potansiyel toksik element kaynaklı ekolojik risk analizleri için Gölyazı Köyü'nün bulunduğu

yarımadada boyunca kıyı çizgisini saat yönünde 5 - 10 metre açıktan takip ederek litoral zondan eşit aralıklarla 10 farklı noktadan Van Ven Grap kullanılarak sediment örneği alınmıştır. Örnekler kilitli poşetlere koyularak numaralandırılmış ve +4 °C saklama koşullarında laboratuvara ulaştırılmıştır. Toplam organik karbon tayini (TOC) Walkley Black Titrasyon yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Walkley ve Black, 1934; Gaudette vd., 1974). Yaş örneklere aseton ekstraksiyonu yapılarak spektrofotometrik metotla Klorofil Bozunma Ürünleri (Chl-A) analizi gerçekleştirilmiştir (Lorenzen, 1971). PTE içerikleri ICP-OES ile Bureau Veritas Ankara Laboratuvarlarında AQ200 paketi kullanılarak analiz edildi.



Şekil 2. Uluabat Gölü ve yakın çevresinde mostra veren birimlerin dağılımını gösterir harita (Kandemir vd., 2013'ten değiştirilerek hazırlanmıştır).

Figure 2. Distribution of outcropping units around Lake Uluabat (modified from Kandemir et al., 2013).

Analitik Prosedürler

PTE'lerin antropojenik kaynaklardan ne düzeyde etkilendiğinin tespit edilmesi amacıyla zenginleşme faktörü (EF) hesaplandı. EF hesaplamasında sediment içerisinde tane boyundan kaynaklanan hatanın en aza indirilmesi için yerkabuğunun ana bileşenlerinden olan Fe konservatif element olarak kullanıldı. Fe ise bir diğer konservatif element olan Al ile normalize edildi (Zhang vd., 2016).

EF şu formül ile hesaplanmaktadır (1):

$$EF = \frac{\left(\frac{C_i}{C_{ref}}\right)_{örnek}}{\left(\frac{B_1}{B_{ref}}\right)_{ardalan}} \quad (1)$$

Formülde; C_i çalışılan PTE'nin sedimentteki konsantrasyonu, C_{ref} normalizasyon için kullanılan Fe'nin konsantrasyonunu, B_i PTE'nin bölgesel aralan değerini, B_{ref} ise normalizasyon için Fe'nin aralan değerini temsil etmektedir.

EF'nin değerlendirilmesinde Sutherland (2000) skalası kullanılmıştır. Bu skalaya göre; $EF < 2$ minimal zenginleşmeyi, $EF = 2-5$ orta düzeyli zenginleşmeyi, $EF = 5-20$ önemli düzeyde zenginleşmeyi, $EF = 20-40$ çok yüksek düzeyde zenginleşmeyi ve $EF > 40$ ise aşırı yüksek düzeyde zenginleşmeyi göstermektedir.

Sedimentteki PTE konsantrasyonunda olası insan etkisini belirlemek amacıyla kullanılan Kontaminasyon faktörü (CF) ve aşağıdaki formülle (2) hesaplandı;

$$CF = C_i - C_{ni} \quad (2)$$

CF, mevcut PTE konsantrasyonunun aralan olarak kullanılan PTE konsantrasyonuna bölünmesiyle hesaplanır. Formülde; C_i element konsantrasyonu, C_{ni} ise elementin aralan değerine karşılık gelmektedir. Hakanson (1980)'a göre CF; düşük kontaminasyon ($CF < 1$), orta düzeyli kontaminasyon ($1 \leq CF < 3$), yüksek kontaminasyon

($3 \leq CF < 6$) ve çok yüksek kontaminasyon ($CF > 6$) şeklinde değerlendirilir.

CF verilerinin teyit edilmesi için mCd geliştirilmiştir (Abraham ve Parker, 2008). mCd şu şekilde hesaplanmaktadır (3):

$$mCd = \frac{\sum_{i=1}^n nCF}{n} \quad (3)$$

Formülde, CF kontaminasyon faktörü; n ise analizde kullanılan element sayısıdır. mCd bulguları şu şekilde değerlendirilmektedir; mCd $< 1,5$ çok düşük, $1,5 < mCd < 2$ düşük, $2 < mCd < 4$ orta, $4 < mCd < 8$ yüksek, $8 < mCd < 16$ çok yüksek, $16 < mCd < 32$ aşırı derece yüksek ve $mCd > 32$ ultra yüksek kontaminasyon (Abraham ve Parker, 2008).

Sedimentin PTE kaynaklı kirlilik yükünü belirlemek amacıyla kirlilik yük indeksi (PLI) kullanılmaktadır (Tomlinson vd., 1980). PLI şu şekilde hesaplanmaktadır (4):

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{1/n} \quad (4)$$

Formülde; CF kontaminasyon faktörünü, n analizde kullanılan PTE sayısını temsil etmektedir. PLI verileri; 0 ise kirlilik riski yok olarak kabul edilmiş, ancak 1 değerinin aşılması durumunda gelecekte kirlilik riski ortaya çıkacağı şeklinde yorumlanmaktadır (Tomlinson vd., 1980).

Sediment bünyesinde biriken PTE'lerin ekosistem üzerindeki potansiyel toksik etkileri hakkında değerlendirme yapmak için ise yine Hakanson (1980) tarafından geliştirilen potansiyel ekolojik risk indeksi kullanılmıştır. Her PTE için ayrı hesaplanan ekolojik risk faktörü (mER) ve tüm PTE'lerin entegre risk seviyesini ifade eden potansiyel ekolojik risk faktörü (PER) aşağıdaki formülle (5) hesaplanmaktadır (Hakanson, 1980; Zhang vd., 2016).

$$mER = E \times T \quad (5)$$

Formülde kullanılan mERi her PTE için ayrı hesaplanan risk faktörünü, E, zenginleşme faktörünü, T ise her PTE için farklı toksisite katsayısına karşılık gelmektedir.

PTE'ler için kullanılan toksisite katsayıları şunlardır: Hg-40, Cd-30, As T-10, Cu-Pb-Ni-Co-5, Cr-V-2 ve Zn-Mn-1 (Hakanson, 1980).

mER verileri Hakanson (1980)'a göre; düşük potansiyel ekolojik risk ($mER < 40$), orta düzeyli potansiyel ekolojik risk ($40 < mER < 80$), önemli potansiyel ekolojik risk ($80 < mER < 160$), yüksek potansiyel ekolojik risk ($160 \leq mER < 320$) ve çok yüksek potansiyel ekolojik risk ($mER \geq 320$) şeklinde değerlendirilmektedir.

$$PER = \sum mER \quad (6)$$

Potansiyel ekolojik risk (PER) toplam ekolojik risk seviyesini ifade etmektedir. PER verileri Hakanson (1980)'a göre; düşük ekolojik risk ($PER < 150$), orta düzeyli ekolojik risk ($150 < PER < 300$), önemli ekolojik risk ($300 < PER < 600$) ve çok yüksek ekolojik risk ($PER > 600$) şeklinde değerlendirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Potansiyel Toksik Element Konsantrasyonu

PTE konsantrasyonları ortalama değerlere göre Fe (29.201 ppm) > Al (22.120 ppm) > Mn (962

ppm) > Ni (256 ppm) > Cr (101 ppm) > Zn (90 ppm) > As (39 ppm) > Pb (37 ppm) > Cu (31 ppm) şeklinde sıralanmaktadır (Çizelge 1).

Gölyazı litoral zonunda tespit edilen PTE konsantrasyonları mevcut literatürden rastgele seçilen bazı doğal göller ile karşılaştırıldığında özellikle As, Cr, Ni, Pb ve Zn konsantrasyonlarının dikkate değer şekilde yüksek olduğu görülmektedir (Çizelge 2).

Bowen (1979) ve Wedepohl (1978) tarafından yapılan araştırmalarda yer kabuğu Ni ortalaması 80 ppm, sıg su sedimanları Ni ortalaması ise 35 ppm olarak belirtilmektedir. Ultrabazik kayalarda 2000 ppm, baziklerde 134 ppm, siyenitlerde 4 ppm, granitlerde 8 ppm seviyelerinde Ni vardır (Çelenli, 2000). Ortalama değerler ile inceleme alanının değerleri karşılaştırıldığında elde edilen bulgular göldeki Ni kontaminasyonuna dikkat çekmektedir. Volkanik kayaç formasyonları önemli derecede Ni kaynağıdır. Bu durumda göldeki Ni kaynağı muhtemelen litojeniktir. Ancak, taşınım fazları belirlenmediği için bu ifade sınırlı bir yorum olarak değerlendirilmelidir.

Çizelge 1. PTE'lerin örnekleme noktalarındaki konsantrasyon seviyesi (ppm).

Table 1. Concentration levels of PTEs at sampling points (ppm).

PPM	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Mn	Fe	As	Cr	Al
ST 1	33	42	92	263	20	912	29.900	38	103	27.000
ST 2	31	34	90	248	19	983	29.100	46	101	22.200
ST 3	31	34	85	230	18	1035	26.800	49	93	21.300
ST 4	31	36	94	263	20	992	30.200	36	106	23.000
ST 5	32	35	96	277	21	927	31.700	33	111	24.300
ST 6	33	33	97	278	21	932	31.710	34	111	24.500
ST 7	29	33	83	240	18	964	27.600	43	95	19.700
ST 8	28	32	81	239	18	1020	27.000	40	92	18.800
ST 9	28	40	84	248	19	912	27.000	35	93	18.800
ST 10	32	49	93	272	21	945	31.000	33	107	21.600
ORT	31	37	90	256	20	962	29201	39	101	22120

Çizelge 2. PTE’lerin ortalama konsantrasyon seviyelerinin (ppm) diğer sulak alanlar ve kıtasal kabuk değerleri ile karşılaştırılması.

Table 2. Comparison of average concentration levels of PTEs (ppm) with values from other wetlands and continental crust.

	Kaynak	Al	As	Cu	Cr	Co	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Uluabat Gölü	Bu Çalışma	22.120	38	33	103	20	29.201	912	263	42	92
Uluabat Gölü	Barlas vd., 2005			0,75	2,95					1,42	3,89
Sapanca Gölü	Çalışkan, 2017			26,68	19,09			337,81	26,72	15,20	62,00
Hazar Gölü	Özmen vd., 2004			24	35		18.500	423	41		49
Çıldır Gölü	Kükrer vd., 2015	22.583	3,27	30,11	39,57		21.000	781,50	50,12	18,85	64,52
Turekian	Turekian & Wedepohl, 1961		13	45	90		46.700		68	20	95
Taylor’s	Taylor & McLennan, 1995		1,8	55	100		56.300		75	12	70
Kirlilik Yok			< 3		<25		< 17.000		<20	<40	<90
Orta Derecede Kirlili	USEPA, 2007		3-8		25-75		1.700–25.000		20-50	40-60	90-200
Kirli			8 >		75>		25000>		50 >	60 >	200 >
TEC	Macdonald vd., 1996		9,79		43,4				22,7	35,8	121
PEC			33		111				48,6	128	459

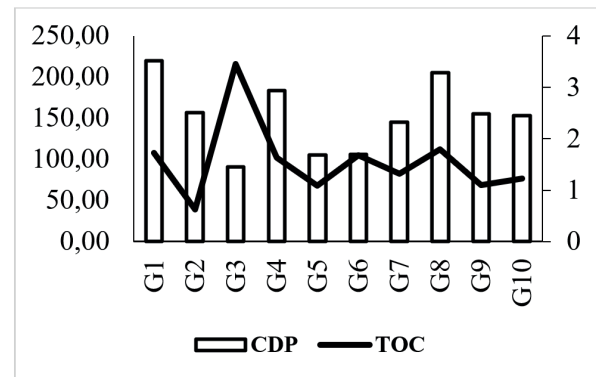
Çelenli tarafından yapılan araştırmalarda Uluabat Gölü sedimentlerinde ortalama 257 ppm Ni tespit edilmiştir (Çelenli, 2000). Mevcut çalışmada göldeki ortalama Ni konsantrasyonu 263 ppm olarak belirlenmiştir. Bu durum elde edilen bulguların geçerli ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

PTE’lerin kıtasal kabuk değerlerini esas alan bazı indekslere göre karşılaştırma yapıldığında; göldeki As seviyesi tüm sınırları aşarak muhtemel etki seviyesini (PEC) dahi geçmiştir. Cr konsantrasyonu tüm eşik değerleri geçerken muhtemel etki seviyesine yaklaşmıştır. Göldeki Ni seviyesi tüm eşik değerlerden 4 katın üzerinde yüksektir. Pb ve Zn konsantrasyonu ise orta derecede kirliliğe işaret etmektedir.

Klorofil Bozunma Ürünleri (CDP) ve Toplam Organik Karbon’un (TOC) mekânsal dağılımları

CDP, sulak alanlardaki birincil üretim süreçlerinin yoğunluğunu temsil etmekle birlikte PTE’lerin

sedimente taşınma ve depolanma süreçlerinde etkin rol oynamaktadır. CDP konsantrasyonu yüzey sedimentinde 91- 219 µg/g arasında tespit edilmiş olup ortalama değer 152 µg/g’dır (Şekil 3). CDP’nin mekânsal dağılışı incelendiğinde; maksimum konsantrasyon ST 1’de, minimum konsantrasyon ST 3’te tespit edilmiştir. CDP konsantrasyonunun mekânsal dağılışı Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3. Sediment örneklerinde CDP ve TOC dağılımı.

Figure 3. Distribution of CDP and TOC in sediment samples.

TOC sulak alandaki organik aktivite yoğunluğunu temsil etmekte olup, miktarının yüksek olduğu sulak alanlarda canlı aktivitesindeki artışa işaret etmektedir. Ayrıca PTE'lerin sediment bünyesine girişi ve depolanması açısından da son derece önemli bir işlevi vardır. Araştırma kapsamında Gölyazı Köyü kıyısının litoral zonundaki TOC konsantrasyonu %0,63 – %3,45 arasında olup ortalama değer 1,56'dır. TOC'un örnekleme istasyonlarındaki dağılışı Şekil 3'te sunulmuştur. Türkiye ve dünyada sulak alanlarının ortalama TOC değeri 2 – 3 arasındadır. TOC değerlerine göre gölde genel bir organik kirlilik söz konusu değildir. Ancak 3. Örnekleme noktası ve yakın çevresindeki TOC konsantrasyonu sonraki çalışmalarda izlenmelidir.

Zenginleşme Faktörünün Mekânsal Dağılışı ve Kontaminasyon Faktörü

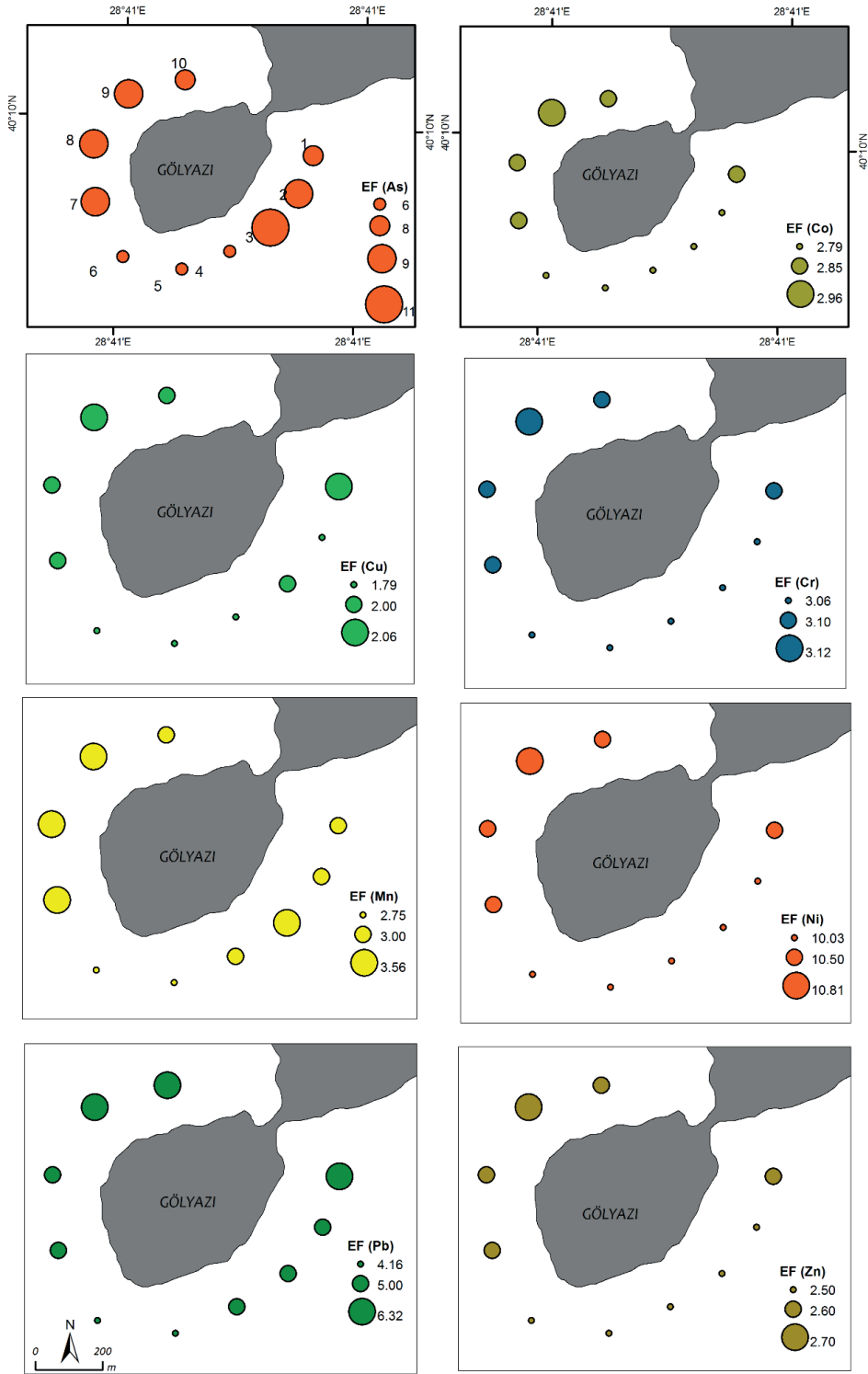
PTE'lerin ortalama EF değerleri Ni (10,31) > As (8,24) > Pb (5,05) > Mn (3,12) > Cr (3,08) > Co (2,81) > Zn (2,58) > Fe (2,30) > Cu (1,88) şeklindedir. Ortalama verilere göre inceleme alanında Cu hariç tüm PTE'lerin antropojenik kaynaklardan etkilenerek belirgin düzeyde zenginleştiği tespit edilmiştir (Şekil 4). Ortalama EF verilerine göre bir değerlendirme yapıldığında; Ni, As, Pb'nin önemli seviyede zenginleştiği, Cu'nun zenginleşmediği, Pb, Mn, Cr, Co, Zn ve Cu'nun orta derecede zenginleştiği tespit edilmiştir (Şekil 4). Bu veriler Gölyazı kırsal yerleşmesi kıyısında litoral zonda antropojenik kaynakların etkisine işaret etmektedir. PTE zenginleşmesinin mekânsal dağılışı analiz edildiğinde; Gölyazı'nın kuzeyinde belirgin bir zenginleşme artışı gözlenmektedir. Bu durumun nedeni arazi çalışmalarıyla analiz edilmiştir.

Arazi çalışmalarından elde edilen bulgulara göre tombolo ve anakaranın kuzeyinde yerleşme faaliyetlerinin daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında tombolonun sap kısmının kuzey ve güneyinde yer alan balıkçı barınakları ve tekneler PTE'lerin zenginleşme seviyesinin artmasına neden olan muhtemel faktörlerdir.

PTE'lerin ortalama CF değerleri Ni (3,76) > As (2,98) > Pb (1,84) > Mn (1,13) > Cr (1,12) > Co (1,03) > Zn (0,94) > Cu (0,68) olarak sıralanmaktadır. Ortalama CF verilerine göre bir değerlendirme yapıldığında; Ni yüksek derecede, As, Pb, Mn, Cr, Co orta derecede, Zn ve Cu düşük derecede kontamine olmuştur. Antropojenik etki değerlendirmesinde kullanılan iki farklı metot konumundaki EF ve CF sonuçları birbiri ile tutarlı durumdadır. PLI değerleri 1,33 – 3,16 arasında değişmekte olup, ortalama 2.18'dir. Ortalama PLI değerine göre Gölyazı kıyıları litoral zon sedimentlerinde PTE kontaminasyonuna bağlı ekolojik risk tespit edilmiştir.

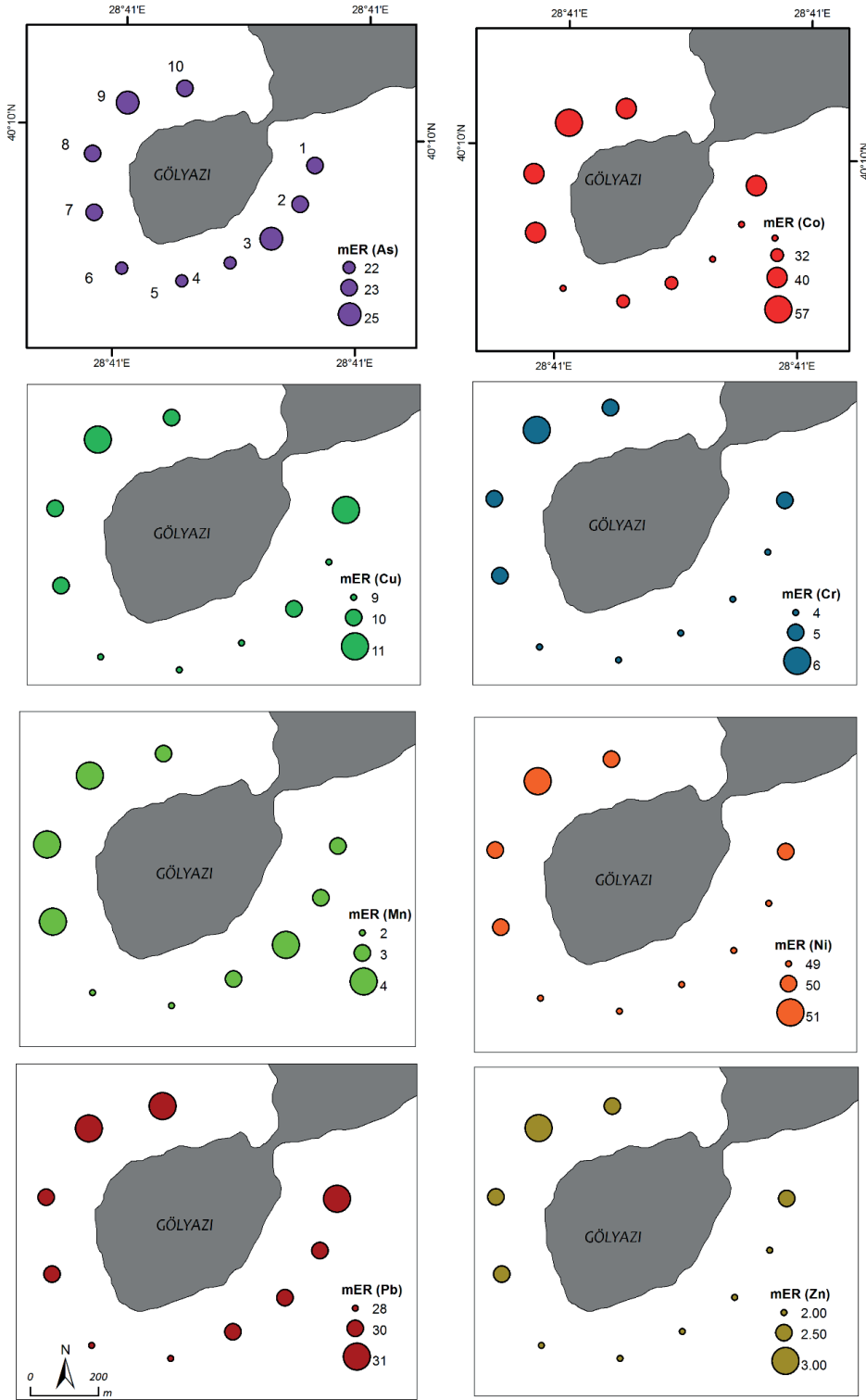
Ekolojik Risk Seviyesinin (mER) Mekansal Dağılışı

mER değerleri Ni (51) > Co (41) > Pb (25) > As (23) > Cu (9) > Cr (5) > Mn (3) > Zn (2) şeklindedir. Bu verilere göre; Ni ve Co önemli derecede ekolojik riskle neden olurken diğer PTE'ler ekolojik riskle neden olmamaktadır (Şekil 5). mER verileri incelendiğinde yüksek risk değerlerinin tıpkı EF değerlerinde olduğu gibi Gölyazı tombolosunun kuzey kıyılarında yoğunlaştığı görülmektedir. Gölün batı kıyılarındaki nispeten daha derin olması, güney kıyılarındaki ise anakara tarafından yerleşme baskısının düşük olması ekolojik risk seviyesini azaltan muhtemel nedenler arasındadır.



Şekil 4. PTE zenginleşmesinin mekânsal dağılışı.

Figure 4. Spatial distribution of PTE enrichment.



Şekil 5. mER'in mekânsal dağılışı.

Figure 5. Spatial distribution of mER.

Modifiye Kontaminasyon Derecesi ve Kirlilik Yük İndeksinin Mekânsal Dağılışı

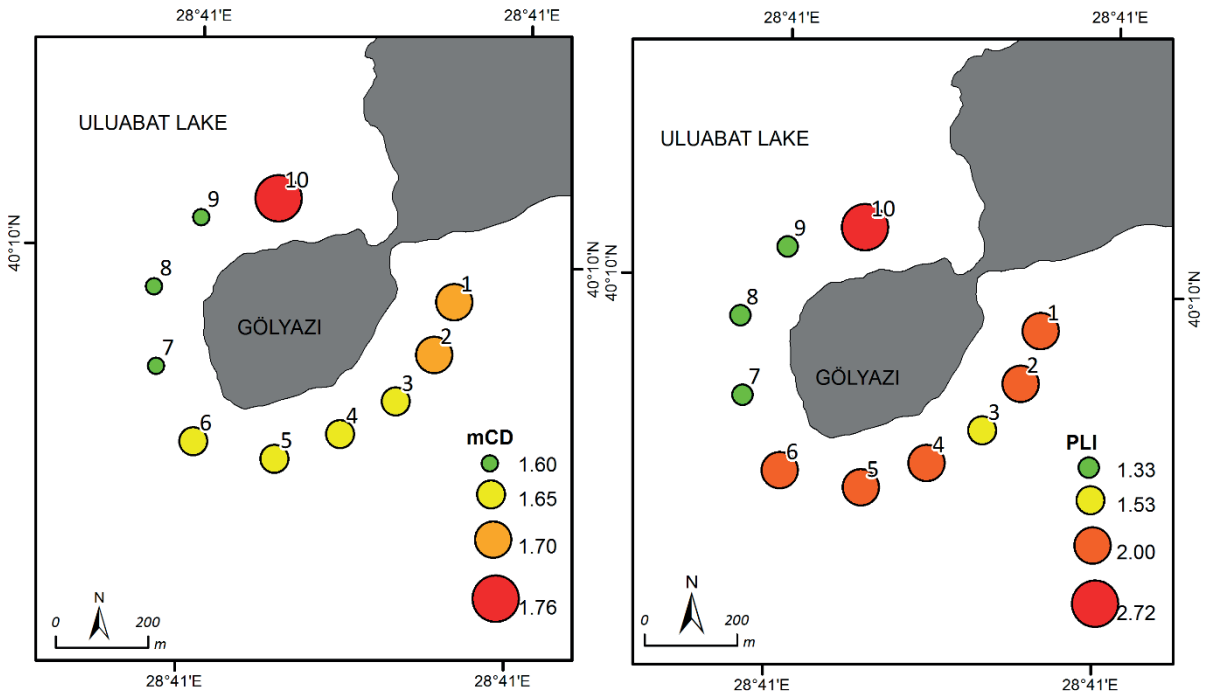
mCD verilerine göre gölde düşük derece PTE kontaminasyonu bulunmaktadır. Ancak 1 – 2 ve 10. örnekleme noktalarındaki nispeten yüksek değerler sonraki çalışmalarda takip edilmelidir. Bahsi geçen örnekleme noktaları balıkçı teknelerinin durduğu alanlardır. Bu nedenle diğer örnekleme noktalarına göre yüksek mCD değerlerinin muhtemel kaynağı teknelerden sızan yağ ve yakıt atıkları olabilir.

PLI değerleri tüm örnekleme noktalarında kirlilik riski olan 1 değerini geçmiş, mCD değerlerinin de maksimuma ulaştığı 10. Örnekleme noktasında pik yapmıştır (Şekil 6). Farklı analitik verilere göre çalışan her iki indeksin de benzer örnekleme noktalarında kirliliğe / kirlilik riskine işaret etmesi dikkat çekicidir. PLI verileri Gölyazı litoral zonunda tüm örnekleme noktalarında PTE kaynaklı kirlilik riski bulunduğu işaret etmektedir.

Potansiyel Ekolojik Risk (PER) ve Toksik Riskin (TRI) Mekansal Dağılışı

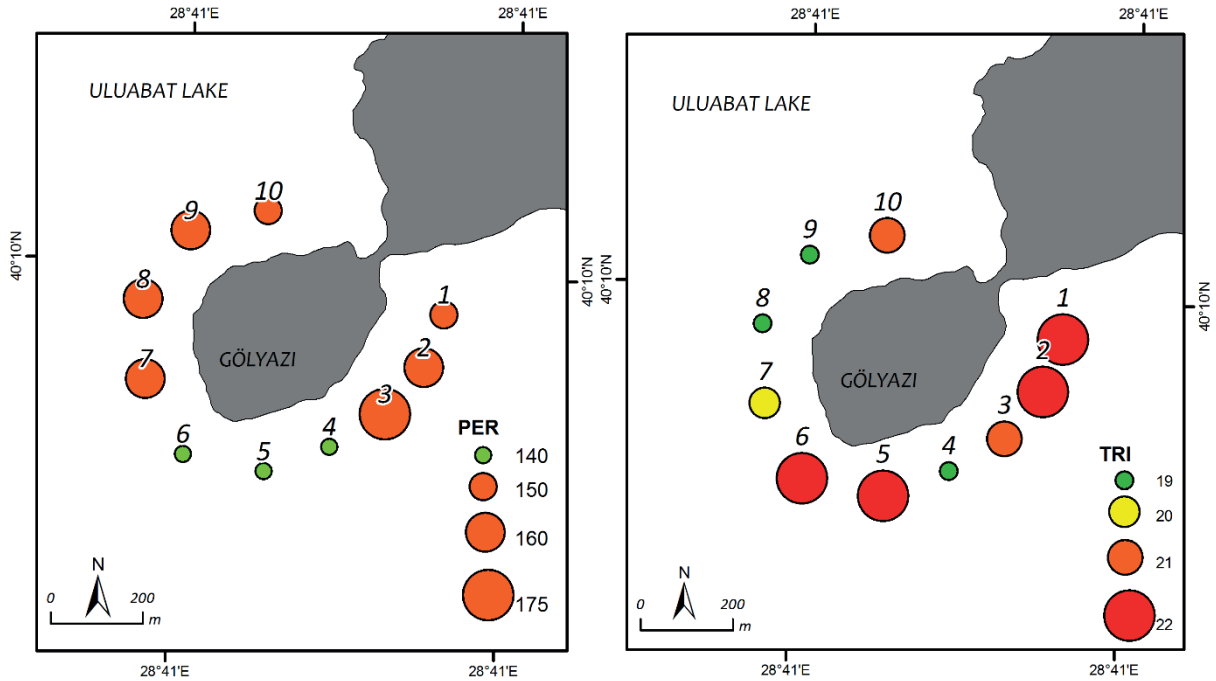
Göldeki ortalama potansiyel ekolojik risk (PER) değeri 161 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular inceleme alanı genelinde ortalama verilere göre orta düzeyde ekolojik risk tehlikesi olduğunu göstermektedir. Potansiyel ekolojik risk seviyesinin mekânsal dağılışı analiz edildiğinde risk seviyesinin tombolonun kuzey ve güneyinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir (Şekil 7).

TRI değerleri 19,82 - 21,55 arasında değişmektedir. TRI değerlerinin 15-20 arasında olması önemli seviyede toksik riske, 20 ve üzerinde olması ise çok önemli seviyede toksik riske işaret ettiğinden (Zhang vd., 2016) neredeyse tüm örneklerde çok yüksek seviyede toksik risk olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Modifiye Kontaminasyon Derecesi ve Kirlilik Yük İndeksinin mekânsal dağılışı.

Figure 6. Spatial distribution of the Modified Contamination Degree and Pollution Load Index.



Şekil 7. Potansiyel Ekolojik Risk ve Toksik Risk İndeksi dağılımları.

Figure 7. Distributions of Potential Ecological Risk and Toxic Risk Index.

PTE'lerin toksik riskten sorumluluk sıralaması $Ni > As > Cr > Pb > Cu > Zn$ şeklindedir. Bu durumda doğal kaynaklı olduğu düşünülen Ni ve antropojenik kaynaklı olan As göldeki toksik risk seviyesini arttırmaktadır. Farklı parametrelere göre çalışan ekolojik risk indekslerinin tamamı tombolonun farklı noktalarında, farklı nedenlere bağlı olarak ekolojik sorunların varlığına işaret etmektedir.

PTE'lerin Taşınma Süreçleri Hakkında İstatistiksel Değerlendirme

Ekolojik risk araştırmalarında potansiyel toksik elementlerin taşınma ve çökeltme süreçlerindeki benzerlikleri tanımlamak için temel bileşenler / faktör, cluster ve korelasyon analizi gibi çok değişkenli istatistiksel yöntemler kullanılır. PTE'ler iki faktör altında kümelendi. Birinci faktör TOC, Ni, Co, Fe, Cr, Zn, Cu ve Al'den; ikinci faktör ise CDP, Pb, As ve Mn'den

oluşmaktadır (Çizelge 3). Bu kümelendirme kaynak tanımlamasından çok ortak taşınım süreçlerini ifade etmektedir. Çünkü EF değerleri yüksek PTE'ler farklı kümelerde yer almıştır.

Faktör analizi sonuçları yanı sıra faktör yükleri (Şekil 8a) ve hiyerarşik kümelendirme diyagramından (Şekil 8b) şu sonuçlar elde edilmiştir;

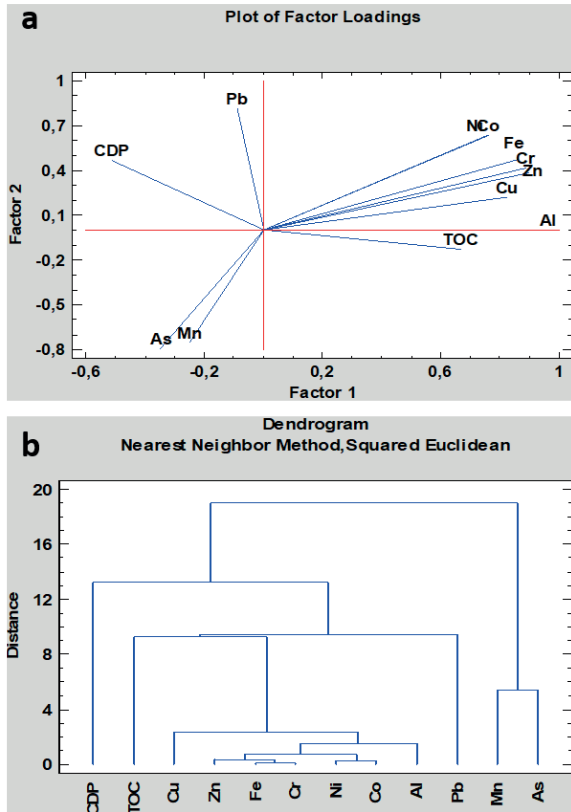
Cu, Zn, Ni, Fe, Co, Cr, Al ortak kaynaklara sahiptir. Bu elementlerin taşınımında organik karbonun rol aldığı düşünülmektedir. Bahsi geçen PTE'ler litojenik kaynaklıdır. Bu elementler genellikle ana kayalardan doğal ayrışma süreçleriyle ortama geçer. Ayrıca, Al ve Fe'nin yüksek korelasyon göstermesi, bu faktörün litojenik karakterini desteklemektedir. Dolayısıyla, bu küme, bölgedeki kayaç yapısına bağlı doğal jeokimyasal arka planın bir yansıması olarak değerlendirilebilir.

- Pb pozitif, As ve Mn ise Pb ile ters yönlü ilişkiye sahip ikinci komponenti oluşturur. Bu elementlerin bitkiler tarafından absorbe edilerek sedimente taşındığı düşünülmektedir.
- Pb ve As gibi elementler genellikle antropojenik kaynaklara bağlı olarak ortamlarda artış gösterir. Göl çevresi önemli bir tarım ve sanayi havzasıdır. Bu kapsamda Pb ve As'nin muhtemel kaynağı tarımda kullanılan pestisitler ve sanayi atıklarıdır.

Çizelge 3. Faktör analizi sonuçları.

Table 3. Results of factor analysis.

	Faktör 1	Faktör 2
CDP	-0,51	0,46
TOC	0,66	-0,12
Cu	0,82	0,22
Pb	-0,08	0,81
Zn	0,89	0,38
Ni	0,75	0,63
Co	0,76	0,63
Mn	-0,24	-0,74
Fe	0,85	0,47
As	-0,35	-0,79
Cr	0,88	0,41
Al	0,96	0,02



Şekil 8. a) Faktör yükleri ve (b) hiyerarşik kümelendirme diyagramı.

Figure 8. a) Factor loadings and (b) hierarchical clustering dendrogram.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular değerlendirildiğinde; analitik veri ortalamalarına göre (ppm) Gölyazı çevresinde PTE konsantrasyonu $Fe (2.920) > Al > (2.150) > Mn (962) > Ni (256) > Cr (101) > Zn (90) > As (39) > Pb (37) > Cu (31) > Co (20)$ şeklinde sıralanmıştır. Zenginleşme faktörü verilerine göre PTE'lerin antropojenik kaynaklardan etkilenme düzeyi $Ni (10,31) > As (8,24) > Pb (5,05) > Mn (3,12) > Cr (3,08) > Co (2,81) > Zn (2,58) > Fe (2,30) > Cu (1,88)$ şeklindedir. PTE kaynaklı ekolojik risk seviyesi $Ni (51) > Co (41) > Pb (25) > As (23) > Cu (9) > Cr (5) > Mn (3) > Zn (2)$ şeklinde olup ortalama potansiyel ekolojik risk seviyesi 161'dir. Gölyazı tombolosu litoral zonundan elde edilen sedimentolojik kayıtlara göre inceleme alanında belirgin bir ekolojik bozulma söz konusu olmamasına rağmen antropojenik etkiler tespit edilmiştir. Antropojenik etki değerlendirmesi yapan risk indeksleri Ni ve Co PTE'lerinin inceleme alanındaki ekolojik risk seviyesini arttırdığına işaret etmektedir. Sulak alan çevresinde yapılan arazi çalışmaları ve mevcut literatür Co ve Ni kaynağının ise doğal litolojik formasyonlar olabileceğini göstermektedir. Bölgedeki Co yatakları mevcut bulguyu desteklemektedir. Sulak alandaki evsel ve endüstriyel atık kaynaklı olarak

zenginleşen Pb, As ve Mn konsantrasyonları ile muhtemelen litojenik kaynaklı olan Ni ve As konsantrasyonunun artması ekolojik risk seviyesini arttıracak için gerekli izleme çalışmalarının yapılması şarttır.

EXTENDED SUMMARY

Designated as a Ramsar site in 1998 and granted international protection status, Lake Uluabat and its wetland area are currently facing ecological risks associated with potential toxic elements (PTEs). Along the Gölyazı shores, which are used as a recreational area, visible anthropogenic pressure and pollution are observed, in addition to the deterioration in water and sediment quality at the shallow lake bottom. This study aimed to monitor ecological risks caused by potential toxic elements in the littoral zone located on the tombolo where Gölyazı village is situated. Within the scope of the study, sediment samples were collected from 10 different sampling points along the shoreline using a Van Veen grab sampler. Total organic carbon in sediments was determined by the Walkley–Black titration method, chlorophyll degradation products were analysed with the spectrophotometric method, and PTE contents were measured using ICP–OES.

To determine anthropogenic pollution in the sediment samples, enrichment factor (EF), contamination factor (CF), modified contamination degree (mCd), pollution load index (PLI), and potential ecological risk (PER) indices were calculated. In EF analyses, Fe was used as a conservative reference element, and background values were considered in CF calculations. The obtained data were evaluated according to the scales of Sutherland (2000) and Hakanson (1980). According to the analysis results, PTE concentrations along the Gölyazı shores are ranked as $Fe > Al > Mn > Ni > Cr > Zn > As > Pb > Cu > Co$. Particularly, Ni, As, Pb, and Cr concentrations were found to be higher than the continental

crust and natural lake sediment averages. The Ni concentration, in particular, is at a high level consistent with previous studies, which supports the reliability of the findings.

Based on the obtained data, chlorophyll degradation products (CDP) range between 91–219 µg/g. Total organic carbon (TOC) values range between 0.63% and 3.45%. According to EF values, Ni, As, and Pb are significantly enriched, which can be attributed to settlements and fishing activities concentrated along the northern shores of Gölyazı. CF values similarly indicate that Ni has high contamination level, while As and Pb have moderate contamination levels. The average PLI value is 2.18, indicating a pollution risk at all sampling points.

Ecological risk analyses revealed that Ni and Co elements pose significant ecological risks. According to mER data, the risk increases along the northern shores of the Gölyazı tombolo. The average PER value of 161 indicates a moderate level of ecological risk. Toxic risk index (TRI) values range between 19.82–21.55, demonstrating the presence of a high level of toxic risk in the lake. The effect of PTEs on toxic risk decreases in the following order: $Ni > As > Cr > Pb > Cu > Zn$.

Statistical analyses indicate that two factor clusters explain the transport processes of PTEs. The first factor consists of Cr, Ni, Co, Fe, Zn, Cu, and Al, representing lithogenic source elements, while the second factor consists of CDP, Pb, As, and Mn, reflecting anthropogenic influences.

KATKI BELİRTME

Bu proje TÜBİTAK 2209-A- Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK’a verdikleri destekten ötürü teşekkür ederiz.

ORCID

Buse Öğreten  <https://orcid.org/0009-0005-3214-2219>

Ahmet Evren Erginal  <https://orcid.org/0000-0002-3112-5258>

Şakir Fural  <https://orcid.org/0000-0002-1603-2424>

Serkan Kükrer  <https://orcid.org/0000-0001-6924-3199>

Erdal Öztura  <https://orcid.org/0000-0002-3749-1013>

KAYNAKLAR / REFERENCES

- Abraham, G. & Parker, R. (2008). Assessment of Heavy Metal Enrichment Factors and the Degree of Contamination in Marine Sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, 227-238. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>
- Arslan, N., Koç, B. & Çiçek, A. (2010). Metal Contents in Water, Sediment, and Oligochaeta-Chironomidae of Lake Uluabat, a Ramsar Site of Turkey. *The Scientific World Journal*, 10, 1269–1281. <https://doi.org/10.1100/tsw.2010.117>
- Aykır, D., Fural, Ş., Kükrer, S., Mutlu, Y. E. (2023). Elementbased ecological and human health risk assessment in a lagoon system in a densely populated basin. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 52(1), 1–19. <https://doi.org/10.26881/oahs-2023.1.01>
- Aykol, A., Budakoglu, M., Kumral, M., Gultekin, A. H., Turhan, M., Esenli, V., Yavuz, F. & Örgün, Y. (2003). Heavy metal pollution and acid drainage from the abandoned Balya Pb-Zn sulfide Mine, NW Anatolia. *Environmental Geology*, 45, 198–208. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0866-2>
- Barlas, N., Ahabab, M. A. & Aydoğan, M. (2005). Assessment of Heavy Metal Residues in the Sediment and Water Samples of Uluabat Lake, Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 74, 286-293. <https://doi.org/10.1007/s00128-004-0582-y>
- Bowen, H. J. M. (1979). *Environmental chemistry of the elements*. Academic, London NY-Toronto.
- Çelenli, A. (2000). *Uluabat Gölü Çevre Jeokimyası*. [Yayımlanmamış Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çelik, G. (2000). *Çevre Yönetiminde Ekolojik Risk Değerlendirmesi ve Uluabat Ramsar Alanı İçin Problem Formülasyonu* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fural, Ş., Kükrer, S. & Cürebal, İ. (2020). Geographical information systems based ecological risk analysis of metal accumulation in sediments of İkizcetepeler Dam Lake (Turkey). *Ecological Indicators*, 119, Article 106784. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106784>
- Fural, Ş., Kükrer, S., Cürebal, İ. & Aykır, D. (2021). Spatial distribution, environmental risk assessment, and source identification of potentially toxic metals in Atikhisar dam, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, Article 268. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09062-6> PMID:33860380 .
- Gaudette, H. E., Flight, W. R., Toner, L. & Folger, W. (1974). An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, 249–253. <https://doi.org/10.1306/74D729D7-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Hacısalıhoğlu, S. & Karaer, F. (2004). Ecological Risk Assessment and Problem Formulation for Lake Uluabat, a Ramsar State in Turkey. *Environmental Management*, 33, 899–910.
- Hacısalıhoğlu, S. & Karaer, F. (2020). Uluabat Gölü Noktasal Kirlenici Kaynaklar ve Kirlilik Yükleri. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 2, 258-267.
- Hakanson, L. (1980). An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach. *Water Research*, 14, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hoşgören, M. Y. (1994). Türkiye'nin Gölleri. *Türk Coğrafya Dergisi*, 29, 19-51.
- Kandemir, Ö., Pehlivan Ş., Kanar, F., Tok, T. (2013). 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları serisi, Bursa-H21 paftası. No:191. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.
- Kazancı, N., Leroy, S., İleri, Ö., Emre, Ö., Kibar, M. & Öncel, S. (2004). Late Holocene erosion in NW Anatolia from sediments of Lake Manyas, Lake Ulubat and the southern shelf of the Marmara Sea, Turkey. *Catena*, 57(3), 277-308. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.11.004>
- Kuşçu, İ. (2024). Uluabat Gölü (Bursa) alansal değişim analizi (1987-2023). *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 10(2), 87-93.

- Kükrer, S., Erginal, A. E., Şeker, S. & Karabıyıkoglu, M. (2015). Distribution and Environmental Risk Evaluation of Heavy Metal in Core Sediments from Lake Çıldır (NE Turkey). *Environmental MonitoringnAssessment*, 180, Article 453. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4685-1>
- Kükrer, S., Çakır, Ç., Kaya, H., & Erginal, A. E. (2019). Historical record of metals in Lake Küçükçekmece and Lake Terkos (Istanbul, Turkey) based on anthropogenic impacts and ecological risk assessment. *Environmental Forensics*, 20(4), 385–401. <https://doi.org/10.1080/15275922.2019.1657985>
- Lorenzen, C. J. (1971). Chlorophyll-degradation products in sediments of Black Sea. Degens, E. T. & Ross, D. A. (Eds.), *The Black Sea—Geology, Chemistry, and Biology*, (426–428). *American Association of Petroleum Geologists, Volume 20*. <https://doi.org/10.1306/M20377C9>
- Macdonald, D., Carr, R., Calder, F. & Long, E. (1996). Development and Evaluation of Sediment Quality Guidelines for Florida Coastal Waters. *Ecotoxicology*, 5, 253-278. <https://doi.org/10.1007/BF00118995>
- Özmen, H., Kulahcı, F., Cukurovalı, A. & Dogru M. (2004). Concentrations of heavy metal and radioactivity in surface water and sediment of Hazar Lake (Elazığ, Turkey). *Chemosphere*, 55, 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.11.003>
- Sanei, H., Outridge, P. M., Oguri, K., Stern, G. A., Thamdrup, B., Wenzhöfer, F., Wang, F., & Glud, R. N. (2021). High mercury accumulation in deep-ocean hadal sediments. *Scientific Reports*, 11(1), Article 10970. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90459-1> PMID:34040077.
- Sarı, E. (2008) Sources and distribution of heavy metals in river sediments from the southern drainage basin of the sea of Marmara, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 17, 2007-2019.
- Sutherland, R. A. (2000). Bed Sediment-Associated Trace Metals in an Urban Stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39, 611- 627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
- Taylor, S. R. & McLennan, S. M. (1995). The geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysic*, 33(2), 241-265. <https://doi.org/10.1029/95RG00262>
- Tekiner, M., Tunçay, T. & Parlak, M. (2025). Environmental and Ecological Risks Posed by Sediment Heavy Metals in Reservoirs: A Preliminary Study from Northwest Türkiye. *Journal of Agricultural Sciences*, 31(1), 59 – 70. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.1486524>
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R. & Jeffery, D. W. (1980). Problems in the Assessment of Heavy-Metal Levels in Estuaries and the Formation of a Pollution Index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33, 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
- Turekian, K. & Wedepohl, K. (1961). Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *GSA Bulletin*, 72, 175-192. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DOTEIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2)
- Uludağ, M., Kükrer, S. & Erginal, G. (2018). Anthropogenically-induced ecological risks in Lake Erikli, NW Turkey. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 5(3), 273-283. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.459496>
- USEPA, (2007). Method 3051a: *Microwave Assisted Acid Dissolution of Sediments, Sludges, Soils, and Oils, Revision 1*. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Ustaoglu, F., Islam, M. S. & Tokatli, C. (2022). Ecological and probabilistic human health hazard assessment of heavy metals in Sera Lake Nature Park sediments (Trabzon, Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09838-1>
- Walkley, A. & Black, I. (1934). An Examination of the Degthareff Method far Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wedepohl, K. H. (1979). *Handbook of geochemistry*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, NY.
- Zhang, G., Bai, J., Zhao, Q., Lu, Q., Jia, J. & Wen, X. (2016). Heavy Metals in Wetland Soils Along a Wetland-Forming Chronose Quence in the Yellow River Delta of China: Levels, Sources and Toxic Risks. *Ecol Indicator*, 69, 331–340. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.042>