

Sediment tarama işlemi yapılan kentsel bir sulak alanda potansiyel toksik element kaynaklı ekolojik risk analizi: Mogan Gölü (Türkiye)

Ecological risk analysis of potential toxic elements in an urban wetland with sediment dredging: Lake Mogan (Türkiye)

Şakir Fural^{a*}  Dilek Aykır^b  Murat Poyraz^c  Serkan Kükrer^d  İsa Cürebal^e 

^aKırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen – Edebiyat Fakültesi – Coğrafya Bölümü, Kırşehir, Türkiye.

^bİzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Sosyal ve Beşeri Bilimler Fakültesi, Coğrafya Bölümü, İzmir, Türkiye.

^cKırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Fen – Edebiyat Fakültesi – Coğrafya Bölümü, Kırşehir, Türkiye.

^dİzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye.

^eBalıkesir Üniversitesi, Fen – Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Balıkesir, Türkiye.

ORCID: Ş.F. 0000-0002-1603-2424; D.A. 0000-0002-3334-4534; M.P. 0000-0002-5915-6873; S.K. 0000-0001-6924-3199; İ.C. 0000-0002-3449-1595

BİLGİ/INFO

Geliş/Received: 25.10.2025

Kabul/Accepted: 01.12.2025

Anahtar Kelimeler:

Limnoloji

Potansiyel Ekolojik Risk

Mogan Gölü

Keywords:

Limnology

Potential Ecological Risk

Lake Mogan

*Sorumlu yazar/Corresponding author:

(Ş. Fural) sakir.fural@ahievran.edu.tr

DOI: 10.17211/tcd.1810776



Atıf/Citation:

Fural, Ş., Aykır, D., Poyraz, M., Kükrer, S., & Cürebal, İ. (2025). Sediment tarama işlemi yapılan kentsel bir sulak alanda potansiyel toksik element kaynaklı ekolojik risk analizi: Mogan Gölü (Türkiye). *Türk Coğrafya Dergisi* (88), 185-197.

<https://doi.org/10.17211/tcd.1810776>

ÖZ/ABSTRACT

Mogan Gölü, Ankara kent merkezinin güneyinde Gölbaşı ilçesi sınırları içerisinde yer alan, 6.5 km² alan kaplayan bir alüvyal set gölüdür. Son yıllarda gölde ortaya çıkan ve gözle görülür seviyelere ulaşan ekolojik bozulmalar nedeniyle 2017 – 2022 yılları arasında göl tabanında sediment tarama işlemi gerçekleştirilerek ekolojik bozulmaya uğramış sediment tabakası 50 cm kazınıp gölden çıkarılmıştır. Bu araştırma sediment kazıma işlemi yapılan ve yapılmayan bölgedeki ekolojik risk seviyesini karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında gölün farklı noktalarından 25 adet yüzey sedimenti alınmış, PTE konsantrasyonu, toplam organik karbon ve klorofil bozunma ürünleri analizleri gerçekleştirilmiştir. Ekolojik risk seviyesini ve antropojenik etkileri analiz etmek amacıyla zenginleşme faktörü, jeoakümülayon indeksi, ekolojik risk faktörü ve potansiyel ekolojik risk faktörü hesaplamaları yapılmıştır. Analiz sonuçları mekânsal ve istatistiksel analizlere tabi tutulmuştur. PTE konsantrasyonu ortalama değerlere göre ppm olarak şu şekilde sıralanmıştır: Fe (21300) > Al (19900) > P (630) > Mn (513) > Ni (95) > Cr (62) > Zn (51) > Cu (27) > As (15) > Pb (14) > Mo (1.82) > Cd (0.12) > Hg (0.050). Antropojenik etki değerlendirmesi analizlerinde ortalama verilere göre Pb, Ni, Cu, Cr, Mo, Cd, Fe orta derecede zenginleşmiştir. Noktasal girdiler P ve Hg için orta derecede zenginleşmeye neden olmuştur. Ekolojik risk analizi Mogan Gölü'nde Cd ve Hg kaynaklı, orta derecede potansiyel ekolojik risk bulunduğunu göstermiştir. Çalışmada; gölde yerleşme, tarım ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan kirlilik yükünün arttığı, bunun da ötrofikasyonu hızlandırarak ekosistemi tehdit ettiği belirlenmiştir. Sediment tarama sonrası PTE konsantrasyonu ve ekolojik risk düzeylerinde azalma görülse de değerlerin hâlâ risk oluşturduğu, bu nedenle kentsel, endüstriyel ve tarımsal kaynaklı baskıların sıkı biçimde denetlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Lake Mogan is an alluvial dam lake covering 6.5 km², located within the Gölbaşı district, south of Ankara's city center. Due to visible ecological degradation in the lake in recent years, sediment dredging was carried out between 2017 and 2022, and the degraded sediment layer was removed by scraping approximately 50 cm. This study was conducted to compare the ecological risk level in the area where sediment dredging was performed and the area where it was not. As part of the study, 25 surface sediment samples were collected from different points of the lake, and metal concentrations, total organic carbon, and chlorophyll decay products were analyzed. To analyze the ecological risk level and anthropogenic impacts, enrichment factors, geoaccumulation indexes, ecological risk factors, and potential ecological risk factors were calculated. The analysis results were subjected to spatial and statistical analyses. PTE concentrations were listed in ppm according to average values as follows: Fe (21300) > Al (19900) > P (630) > Mn (513) > Ni (95) > Cr (62) > Zn (51) > Cu (27) > As (15) > Pb (14) > Mo (1.82) > Cd (0.12) > Hg (0.050). According to the average data in the anthropogenic impact assessment analyses, Pb, Ni, Cu, Cr, Mo, Cd, and Fe were moderately enriched. Point sources caused moderate enrichment of P and Hg. Ecological risk analysis showed that there is a moderate potential ecological risk in Mogan Lake due to Cd and Hg. In the study, it was determined that the pollution load on the lake resulting from settlement, agriculture and industrial activities increased, and this threatened the ecosystem by accelerating eutrophication. Although there was a decrease in PTE concentrations and ecological risk levels after sediment screening, it was concluded that the values still pose a risk, therefore urban, industrial and agricultural pressures should be strictly controlled.

Extended Abstract

Introduction

Lake Mogan is an alluvial dam lake covering 6.5 km², located within the Gölbaşı district, south of Ankara's city center. Due to visible ecological degradation in the lake in recent years, sediment dredging was carried out between 2017 and 2022. The degraded sediment layer was removed by scraping off approximately 50 cm of the sediment layer. The lake and its surroundings are located within the "Gölbaşı Special Environmental Protection Area," one of 15 special protection areas declared in Türkiye under the Barcelona Convention. In addition to being a significant wetland and recreational area in its geography, it is one of Turkey's most important natural habitats due to its flora and fauna.

Data and Method

Sediment samples were collected from 25 pre-planned locations on the lake floor using a Van Ween Grab. Rock samples were taken from various geological formations within the basin to determine the background concentrations of PTEs. Acetone extraction and spectrophotometric analysis of chlorophyll degradation products (CDP) were performed on wet sediment samples (Lorenzen, 1971). Sediment samples were oven-dried and then pulverized. Organic carbon (TOC) analysis was performed using the Walkley Black titration method samples (Gaudette et al. 1974). PTE concentration analyses were performed using ICP-MS at the Bureau Veritas Analytical Laboratory in Canada.

The enrichment factor (EF) and geoaccumulation index Igeo were used to determine the natural and anthropogenic sources of the elements. Ecological risk analysis was conducted to analyze the level of ecological risk. Total ecological risk was calculated using potential ecological risk analysis. Spatial analyses were performed using ArcGIS Pro, and statistical assess were performed using Statgraphics 19 software.

Results and Discussion

According to average values, PTE concentrations are listed in ppm as follows: Fe (21300) > Al (19900) > P (630) > Mn (513) > Ni (95) > Cr (62) > Zn (51) > Cu (27) > As (15) > Pb (14) > Mo (1.82) > Cd (0.12) > Hg (0.050). High concentrations of Al, Cr, Fe, Mn, and Ni are concentrated in the central parts of the lake. High concentrations of As, Mo, TOC, and CDP are highest in the area south of the lake, where the main stream discharges. Concentrations of Cd, Cu, Hg, P, Pb, and Zn are at their maximum levels in the area where the Gölbaşı district center was first established. An examination of the spatial distribution of TOC and CDP concentrations reveals a significant transport from the basin to the lake. According to the average EF data, the enrichment level is as follows: Pb (3.70) > Ni (3.60) > Cu (3.30) > Cr (2.89) > Mo (2.80) > Cd (2.77) > Fe (2.13) > Zn (1.75) > Mn (1.54) > Hg (1.53) > As (1.30) > P (1.02). These data show that Pb, Ni, Cu, Cr, Mo, Cd and Fe were moderately enriched under the influence of anthropogenic sources. According to the average mER values, the enrichment level is as follows: Cd (83.02) > Hg (61.22) > Pb (18.51) > Ni (18.01) > Cu (16.50) > As (12.95) > Cr (5.79) > Zn (1.75) > Mn (1.54). Average data indicate that Cd and Hg pose a moderate ecological risk

across the lake, whereas the other elements present no ecological risk. mPER values range from 219 to 290, with an average of 160. According to the average value, Lake Mogan presents a moderate potential ecological risk. A spatial analysis of the potential ecological risk reveals a moderate potential ecological risk. Spatial analysis indicates that PTE concentrations and ecological risk levels have decreased in the dredged area but have not returned to risk-free levels. This highlights the difficulty of eliminating PTEs from aquatic ecosystems. Therefore, to prevent a resurgence of the ecological risk in Lake Mogan, urban waste discharges from the Gölbaşı district into the lake should be monitored, inspections for all industrial facilities, especially mining operations, should be increased, and the use of fertilizers and pesticides on agricultural lands should be controlled.

1. Giriş

Potansiyel toksik elementler (PTE) farklı ekosistemlerde uzun süre bozulmadan kalabilen yüksek toksisiteye sahip olduğu için küresel boyuttaki önemli sorunlar arasında yer almaktadır (Ali vd., 2022; Ustaoglu vd., 2022; Kumar vd., 2022; Töre vd., 2021; Köse vd., 2020; Taş vd., 2019; Kükrer vd. 2019). Lagün, göl, nehir gibi çeşitli sulak alanlarda biriken PTE'lere insanların uzun süre maruz kalması sonucunda ölümcül sağlık problemi riskleri ortaya çıkabilir (Mutlu & Kurnaz 2018; Aykır vd., 2023; Amankwaa vd., 2021; Özkan vd., 2022).

PTE'lerin sucul ekosistemlere taşınması; litolojik yapı, atmosferdeki birikim, erozyon gibi doğal kaynaklardan olabileceği gibi; tarım, kentleşme, madencilik, arıtılmamış atık sular gibi antropojenik faaliyetlerden dolayı olmaktadır (Zahra vd., 2014; İslam vd., 2022; Ustaoglu & Aydın 2020; Jaskula & Sojka 2022). Baraj ve göl gibi ekosistemlerindeki kirlenmenin temel sebebinin doğal faktörlerden daha çok antropojenik etkilerden kaynaklandığı çeşitli çalışmalarda tespit edilmiştir (Jaskula vd., 2021; Tokatlı & Varol 2021; Proshad vd., 2021; Fural vd., 2021; Hoque vd., 2021). Bu nedenle; sucul ekosistemlerde sediment kalitesinin korunması ve bu ekosistemlerin sürdürülebilirliği açısından PTE'lerin kaynağını tespit etmek büyük önem taşımaktadır. Bunun için, ekolojik risk analizleri ve çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır (Varol vd. 2020; Fural & Kükrer 2021). Çalışma kapsamında, ekolojik risk seviyesi ve antropojenik etkileri belirlemek amacıyla zenginleşme faktörü (EF), modifiye ekolojik risk indeksi (mER), modifiye potansiyel ekolojik risk indeksi (mPER), Jeoakümüasyon indeksi Igeo kullanılmıştır. (Hakanson, 1980; Sutherland, 2000; Brady vd., 2015; Tomlinson vd., 1980; Zhang vd., 2016; Müller, 1969). Kirlilik kaynaklarının belirlenmesi için birçok çalışmada olduğu gibi temel bileşenler analizi (PCA), küme analizi (CA), Pearson korelasyon faktör analizi (PCC) gibi çok değişkenli istatistiksel yöntemler tercih edilmiştir (Kükrer vd., 2019; Şimşek vd., 2021, Ustaoglu vd., 2022).

Mogan Gölü, Ankara il sınırları içerisinde, Ankara şehrinin 20 km güneyinde başlangıçta bir akarsu vadisi iken; Gölova, Yavrucak, Başpınar ve Sukesen gibi derelerin taşıdığı alüvyonların vadinin önünü kapatması sonucunda oluşmuş tipik bir alüvyal set gölüdür. Mogan Gölü'nden boşalan sular kısa bir mesafe içinde Eymir Gölü'ne deşarj olmaktadır. Bu kapsamda her iki gölde hidrografik açıdan benzer özellikler göstermektedir (Lahn, 1948; İnandık 1965; Kumral & Yazıcı 2024). Göl ve çevresi, Barselona Sözleşmesi (Barcelona Convention, 1976) (Con-

vention for the Protection of the Mediterranean Sea against Pollution. Barcelona: UNEP/MAP) çerçevesinde Türkiye'de ilan edilen 15 özel koruma bölgesinden bir tanesini oluşturan "Gölbaşı Özel Çevre Koruma Bölgesi" içinde yer alır (Uğurlu, 2020). Mogan Gölü önemli bir sulak alan ve rekreasyon mekanı olmasının yanı sıra florası ve faunası bakımından Türkiye'nin önemli doğal yaşam alanlarındandır. Toplam göl alanı 6.5 km², göl hacmi 14.000.000 m³ ve ortalama derinlik ise 2-3 metredir (Benzer vd., 2013; Yavuz vd., 2015; Binici vd., 2021; Binici vd., 2022).

Göl ve çevresi belirli mevsimlerde pek çok kuş türüne ev sahipliği yapmaktadır. 226 farklı kuş türünün kaydedildiği gölde, özellikle dikkuyruk ve pasbaş patka türleri yoğun bir şekilde üremektedir (Gül vd., 2017). 2000 yılının ortalarına kadar göldeki baskın balık türünün *Esox lucius* olduğu, aynı zamanda *Silurus glanis*, *Cyprinus carpio* ve *Tinca tinca*'nın da oldukça fazla bulunduğu bilinmektedir. 2017 yılında yapılan çalışmalar sonucunda *Cyprinidae*, *Atherinidae* ve *Esocidae* familyalarına ait *Cyprinus carpio*, *Carassius gibelio*, *Tinca tinca*, *Alburnus eschereichii*, *Pseudorasbora parva*, *Atherina boyeri* ve *Esox lucius* gibi balık türlerinin burada yaşamaya devam ettiği tespit edilmiştir (Gül vd., 2017).

Son yıllarda gölde hızla artan ötrofikasyon, kötü koku sorunu vb. ekolojik sorunlar nedeniyle kentsel ve endüstriyel kirliliğin yoğun baskı yaratması sonucu 2017'de başlayan tarama işlemi sırasında oldukça geniş hacimli bir sediment kütlesi gölden dışarı deşarj edilmiştir (Binici vd., 2021; Binici vd., 2022).

Bu çalışmanın amaçları;

- Göldeki PTE konsantrasyonunun ölçülmesi ve toksisitesinin belirlenmesi.
- PTE kaynaklı ekolojik risk seviyesinin analiz edilmesi ve kaynak tanımlaması yapılması.
- Sediment tarama işlemi öncesi ve sonrasındaki ekolojik risk seviyesi değişimlerini rapor ederek göl havzasının yönetim süreçlerine katkı sağlanmasıdır.

2. Yöntem

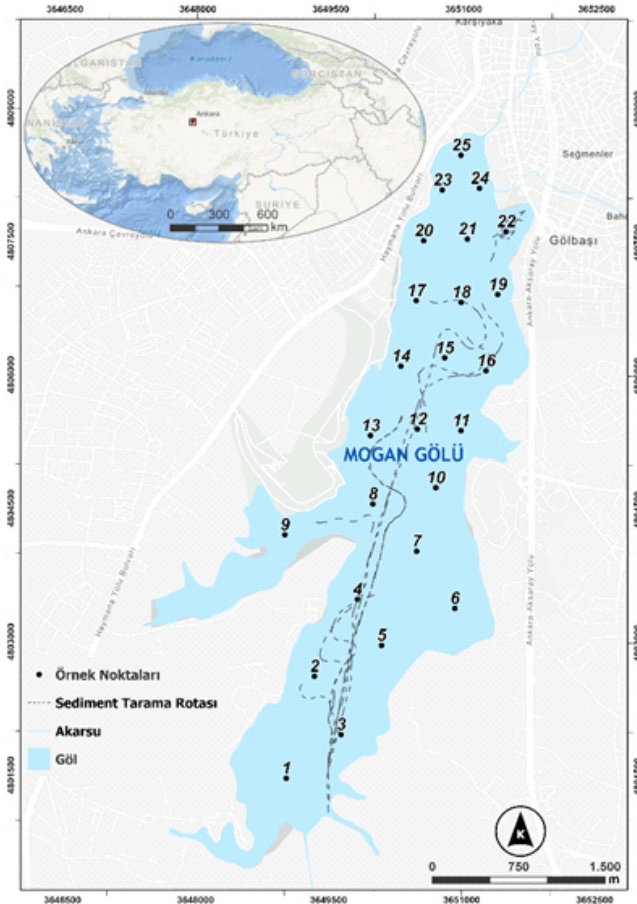
2.1. Sediment Örnekleme ve Analitik Prosedür

Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımları ile kriging enterpolasyon yapmaya uygun aralıklarla olacak şekilde 25 noktadan Van Ween Grab kullanarak tabandan 10 cm derinlikte sediment örneği alınmıştır. PTE'lerin ardaalan değerlerinin belirlenmesi için havza içerisinde farklı jeolojik formasyonlardan kayaç örnekleme yapıldı. Yaş sediment örnekleri üzerinde aseton ekstraksiyon uygulaması ve spektrofotometrik yöntemle klorofil bozunma ürünleri (CDP) analizi gerçekleştirildi (Lorenzen, 1971). Sediment örnekleri etüde kurutulduktan sonra toz haline getirildi. Kurutulan sediment örnekleri kullanılarak Walkley Black titrasyon yöntemiyle organik karbon analizi (TOC) analizi gerçekleştirildi (Walkley & Black 1934; Gaudette vd., 1974). PTE konsantrasyonları analizi ICP-MS ile Kanada merkezli Bureau Veritas Analytical Laboratuvarı'nda gerçekleştirildi. PTE konsantrasyonları parçalanmış faz boyunca ICP-MS ile belirlendi. Örnekler HCl, HNO₃ ve deiyonize suyun konsantre edilmiş, eşit miktarlardan oluşan modifiye edilen çözelti (Aqua Regia) ile çözünmüştür. Analizlerin geçerliliğini test etmek amacıyla referans materyal, duplike ölçümler ve kör örnek ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Referans değerler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Referans değerler.

Table 1. Reference values.

Element	Gözlenen Değer	Beklenen Değer	Ölçüm Limitleri
As (ppm)	42.3	42.8	0.1
Al (%)	1.08	1.14	0.01
Cd (ppm)	2.22	2.28	0.01
Cr (ppm)	58.6	64.9	0.5
Cu (ppm)	142.54	151.34	0.01
Fe (%)	3.06	3.17	0.01
Hg (ppb)	255	258	5
Mn (ppm)	1002	1031	1
Mo (ppm)	13.61	15.08	0.001
Ni (ppm)	78	85	0.1
P (%)	0.068	0.069	0.01
Pb (ppm)	139.45	144.75	0.01
Zn (ppm)	332	343	0.1



Şekil 1. Lokasyon haritası.

Figure 1. Location map.

2.2. Ekolojik Risk İndeksleri

Çalışma kapsamında elementlerin doğal ve antropojenik kaynaklarının tespit edilmesi için aşağıda formülleri belirtilen zenginleşme faktörü (EF) ve jeoakümüasyon indeksi (I_{geo}) kullanılmıştır.

$$EF = \frac{(C_i / C_{ref})^{ÖRNEK}}{(B_i / B_{ref})^{ARDALAN DEĞERİ}} \quad (1)$$

Formülde; C_i element konsantrasyonu, C_{ref} jeokimyasal normalizasyon için kullanılan (Fe) konsantrasyonu, B_i elementin bölgesel aralan değeri, B_{ref} ise normalizasyon için seçilen Fe'nin aralan değerini temsil eder (Sutherland, 2000). EF bulguları Tablo 2a'ya göre yorumlanmıştır.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_m}{(B_m \cdot 1.5)} \quad (2)$$

Formülde; C_m element konsantrasyonu, B_m elementin aralan değeri, 1.5 ise sabit katsayıdır (Müller, 1969). I_{geo} verileri Tablo 2b'ye göre yorumlanmıştır.

Ekolojik risk seviyesini belirlemek için modifiye ekolojik risk analizi (mER) formülü uygulanmıştır.

$$mER = EF \times Tr_i \quad (3)$$

Formülde; EF zenginleşme faktörü, Tr_i ise elementlerin toksik risk katsayısına karşılık gelmektedir. Elementlerin toksik risk katsayıları şu şekildedir; Hg = 40, Cd = 30, As = 10, Cu = Pb = Ni = 5, Cr = 2, Zn = 1, Mn = 1.

Potansiyel ekolojik risk seviyesini tespit etmek için modifiye potansiyel ekolojik risk analizi uygulandı (Formül 4).

$$mPER = \sum_{i=1}^n mER \quad (4)$$

mPER, elementlerin mER değerlerinin toplanmasıyla hesaplanmaktadır. Bulgular tablo 2c ve tablo 2d'ye göre yorumlanmıştır. Ekolojik risk indeksi analiz bulguları Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımı olan Arc – Map Pro arayüzünde yer alan kriging enterpolasyon metodu ile haritalanmıştır (Formül 5).

$$N_p = \sum_{i=1}^n P_i \times N_i \quad (5)$$

Çok değişkenli istatistiksel analizler Statgraphics 19 programı kullanılarak yapılmıştır. Arazi kullanım haritaları CORINE 2018 verileri kullanılarak Arc – Map Pro yazılımıyla hazırlanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. PTE, TOC ve CDP Konsantrasyonlarının Mekânsal Dağılışı

PTE konsantrasyonu ortalama değerlere (ppm) göre olarak şu şekilde sıralanmıştır: Fe (21300) > Al (19900) > P (630) > Mn (513) > Ni (95) > Cr (62) > Zn (51) > Cu (27) > As (15) > Pb (14) > Mo (1.82) > Cd (0.12) > Hg (0.050). Al, Cr, Fe, Mn, Ni'nin yüksek konsantrasyonları gölün orta kesimlerinde yoğunlaşmıştır. As, Mo, TOC ve CDP'nin yüksek konsantrasyonları gölün güneyinde ana akarsu deşarjının olduğu bölgede maksimum seviyeye ulaşmıştır. Cd, Cu, Hg, P, Pb, Zn konsantrasyonları ise Gölbaşı ilçe merkezinin ilk kurulduğu bölgede maksimum düzeydedir (Şekil 2). TOC ve CDP konsantrasyonlarının mekânsal

Tablo 2. Ekolojik risk indeksi sınıfları.

Table 2. Ecological risk index classes.

Tablo 2a: Zenginleşme Faktörü

EF	(Sutherland, 2000)
<2	Zenginleşme yok
2 – 5	Düşük seviyede zenginleşme
5-20	Önemli seviyede zenginleşme
20 – 40	Çok yüksek seviyede zenginleşme
> 40	Aşırı yüksek seviyede zenginleşme

Tablo 2b: Jeoakümüasyon İndeksi

I_{geo}	(Müller, 1969).
≤ 0	Kirlenmemiş
0 <1	Az kirlenmiş
1 <2	Orta derece kirlenmiş
2 <3	Orta – yüksek derecede kirlenmiş
3 <4	Yüksek derecede kirlenmiş
4 <5	Yüksek – çok yüksek derecede kirlenmiş
≥ 5	Çok yüksek derecede kirlenmiş

Tablo 2c: Modifiye Ekolojik Risk İndeksi

mER	(Hakanson, 1980).
< 40	Düşük ekolojik risk
40 ≤ mER < 80	Orta derecede ekolojik risk
80 ≤ mER < 160	Önemli seviyede ekolojik
160 ≤ mER < 320	Yüksek seviyede ekolojik risk
≥ 320	Çok yüksek seviyede ekolojik risk

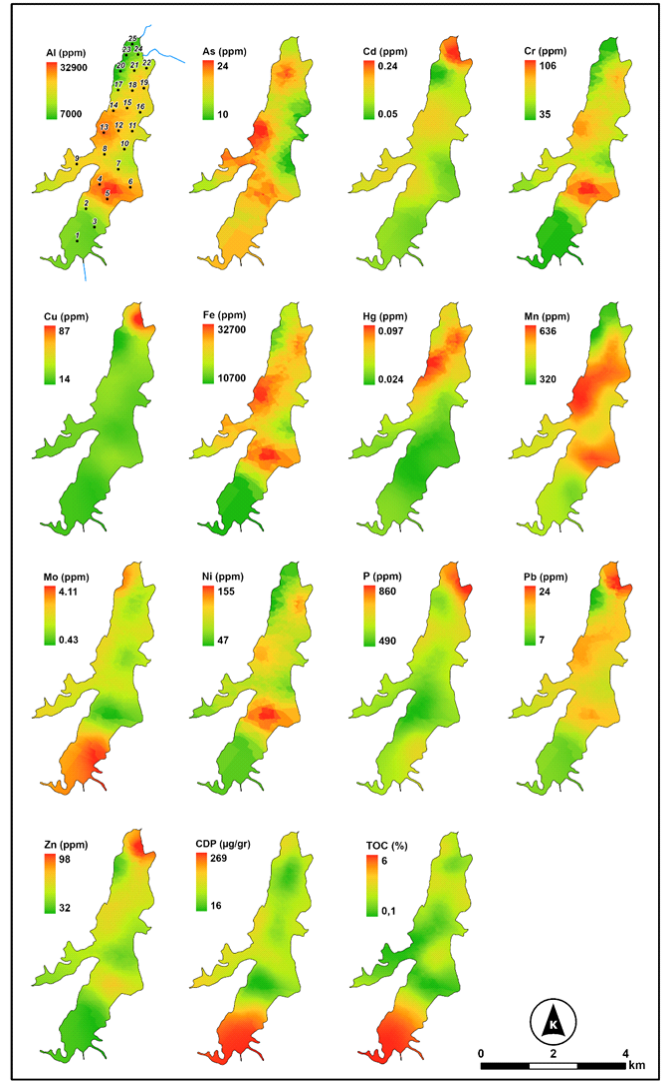
Tablo 2d: Modifiye Potansiyel Ekolojik Risk İndeksi

mPER	(Hakanson, 1980)
< 150	Düşük potansiyel ekolojik risk
150 ≤ mPER < 300	Orta derecede potansiyel ekolojik risk
300 ≤ mPER < 600	Önemli derecede potansiyel ekolojik risk
mPER ≥ 600	Çok önemli derecede potansiyel ekolojik risk

dağılışı incelendiğinde havza içinden göle önemli derecede bir taşınım söz konusu olduğu görülmektedir. PTE ve diğer değişkenlerin mekânsal analizleri incelendiğinde en fazla değişimin göle su deşarj olan Gölova, Yavrucak, Başpınar ve Suksen ve gölden Eymir Gölü'ne su deşarj edilen bölgeler olduğu tespit edilmiştir. Mogan Gölü'nün ortalama PTE konsantrasyonları incelendiğinde; gölde yapılan geçmiş bir çalışmada (Benzer vd., 2013) tespit edilen PTE seviyelerinin günümüze kadar artmaya devam ettiği görülmektedir. Ayrıca göldeki As, Cr ve Ni seviyesi karşılaştırma yapılan diğer sulak alanlara göre belirgin şekilde yüksektir. Bu durum Mogan Gölü'nün kirlenici kaynaklardan etkilendiğini göstermektedir. Turekian'ın geliştirdiği skalaya göre (Turekian & Wedepohl, 1961) gölde As, Ni konsantrasyonları eşik değerleri geçmektedir. Taylor's ve Mc Lennan'ın geliştirdiği skalaya göre gölde As, Ni ve Pb eşik değerleri aşmaktadır. Kitasal kabuk değerlerini baz alan diğer indekslerde As, Ni, Pb, Zn eşik değerleri aşarak dikkat çekmektedir (Tablo 3).

3.2. Antropojenik Etki Değerlendirmesi

PTE'lerin doğal ve antropojenik kaynaklarını ayırt etmek için zenginleşme faktörü ve jeoakümüasyon indeksi uygulandı. Ortalama EF verilerine göre zenginleşme seviyesi Pb (3.70) > Ni (3.60) > Cu (3.30) > Cr (2.89) > Mo (2.80) > Cd (2.77) > Fe (2.13) > Zn (1.75) > Mn (1.54) > Hg (1.53) > As (1.30) > P (1.02) şeklinde sıralanmıştır. Bu veriler Pb, Ni, Cu, Cr, Mo, Cd ve Fe'nin antropojenik kaynaklardan etkilenecek orta derecede zenginleştiğini göstermektedir. EF'nin göl tabanındaki değişimi incelendiğinde; Al zenginleşmesi gölün güneyinde yoğunlaşmaktadır. As zenginleşmesinin gölün güneyinde akarsu girişinde yoğunlaştığı görülmektedir. As zenginleşmesinin maksimuma ulaştığı 20. örnekleme noktası çevresindeki yoğun kirlenme dikkat çekmektedir. Cd zenginleşmesi yerleşmenin en yoğun olduğu bölge olan 24. örnekleme noktası çevresinde maksimuma ulaşmıştır. Bahsi geçen örnekleme noktası ve yakın çevresindeki PTE kirliliği gölde yapılan geçmiş çalışmalarda da dikkat çekmiştir (Küçükosmanoğlu vd. 2020). Bu bölgede önemli seviyede Cd zenginleşmesi tespit edilmiştir. Cr, Mn, Ni



Şekil 2. PTE, TOC ve CDP konsantrasyonunun dağılışı haritaları.

Figure 2. Distribution maps of PTE, TOC, and CDP concentration.

Tablo 3. Mogan Gölü PTE konsantrasyonlarının (ppm) bazı göller ve eşik değerleriyle karşılaştırılması.

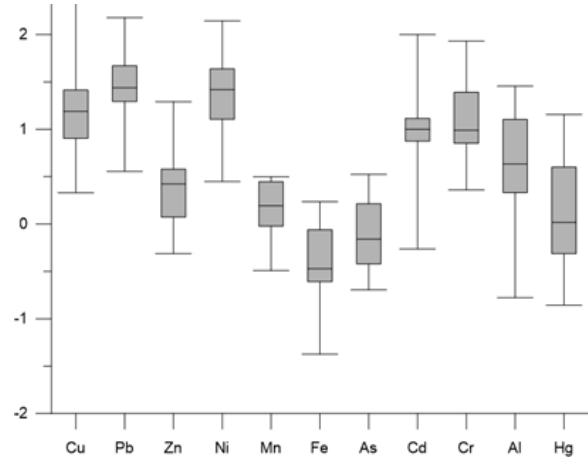
Table 3. Comparison of Mogan Lake PTE concentrations (ppm) with some lakes and threshold values.

	Al	As	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Bu çalışma	19940	15.02	27.09	61.7	21284	513	95.9	14.57	51.9
Mogan Gölü			15.13	28.55		125.66		0.82	13.78
Sapanca Gölü			26.68	19.09		337.81	26.72	15.2	62
Aygır Gölü	13960	4.18	19.34	19.18	13740	386	24.38	12.51	38.84
Çıldır Gölü	22583	3.27	30.11	39.57	21000	781.5	50.12	18.85	64.52
Turekian ve Wedepohl		13	45	90	46700		68	20	95
Taylor's ve Mc Lennan		1.8	55	100	56300		75	12	70
Kirlilik Yok		< 3		<25	< 17000		<20	<40	<90
Orta Derecede Kirli		3-8		25-75	1700 - 25000		20 - 50	40-60	90 - 200
Kirli		8 >		75>	25000>		50 >	60 >	200 >
TEC		9.79		43.4			22.7	35.8	121
PEC		33		111			48.6	128	459

zenginleşmesi göle akarsu girişlerinin olduğu güney kısımda yoğunlaşmıştır. Cu zenginleşmesi şehir ve sanayi atıklarını taşıyan dere ağzında (24. örneklem noktası) önemli seviyeye ulaşmıştır. Hg zenginleşmesi 23. örneklem noktasında orta derecededir. Göl genelinde orta derecede seyreden Mo zenginleşmesi gölün güneyinde akarsu girişlerinin olduğu bölgede önemli seviyeye ulaşmıştır. P, akarsu girişleri ve yerleşmenin yoğun olduğu bölgede orta derecede zenginleşmiştir. Pb göl genelinde orta, akarsu girişlerinin olduğu güney ve yerleşmelerin yoğunlaştığı kuzeyde önemli derecede zenginleşmiştir. Zn yerleşmelerin olduğu kuzey kesimde orta derecede zenginleşmiştir. Mekânsal analiz bulguları elementlerin noktasal zenginleşmeler gösterdiğini ve zenginleşmelerin akarsu girişleri ile kentsel yerleşmenin yoğunlaştığı alanlarda arttığına dikkat çekmektedir (Şekil 3).

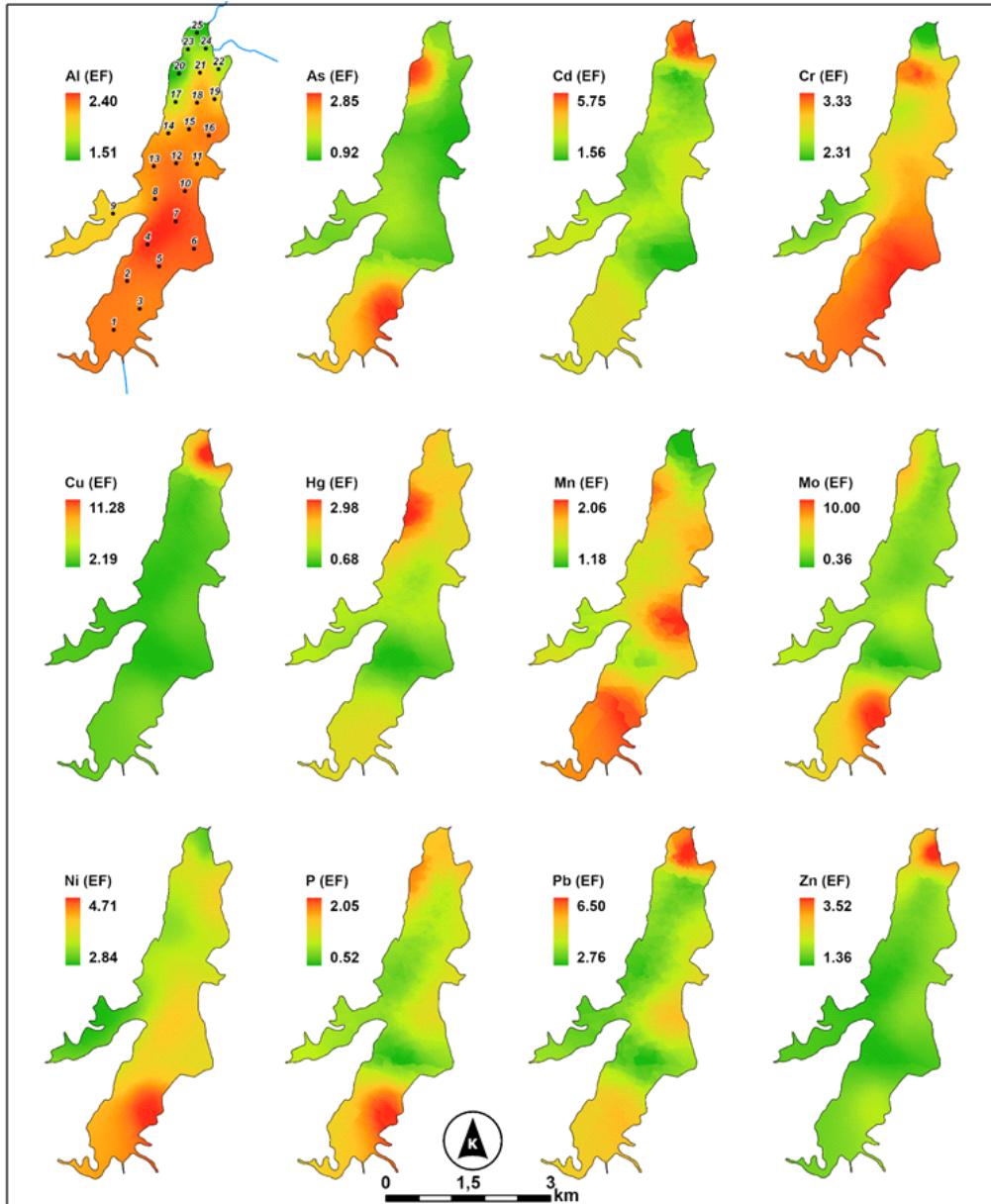
Ortalama I_{geo} verilerine göre bir değerlendirme yapıldığında; Pb, Ni, Cu, Cr'nin göl ekosisteminde orta derecede kirlilik yarattığı, Cd, Hg ve Al'nin orta derecede kirlilik eşiğine yaklaştığı tespit edilmiştir (Şekil 4). Bahsi geçen veriler zenginleşme faktöründen elde edilen bulgular ile uyumludur. Mn, Zn, Fe, As'de

tespit edilen negatif ortalama değerler bahsi geçen PTE'lerin göl genelinde kirlilik sorunu yaratmadığını gösterse de noktasal girdiler ile bazı örneklem noktalarında sorun yaratmaktadır.



Şekil 4. I_{geo} verilerinin box whisker diyagramı.

Figure 4. Distribution of average I_{geo} data by sampling points.



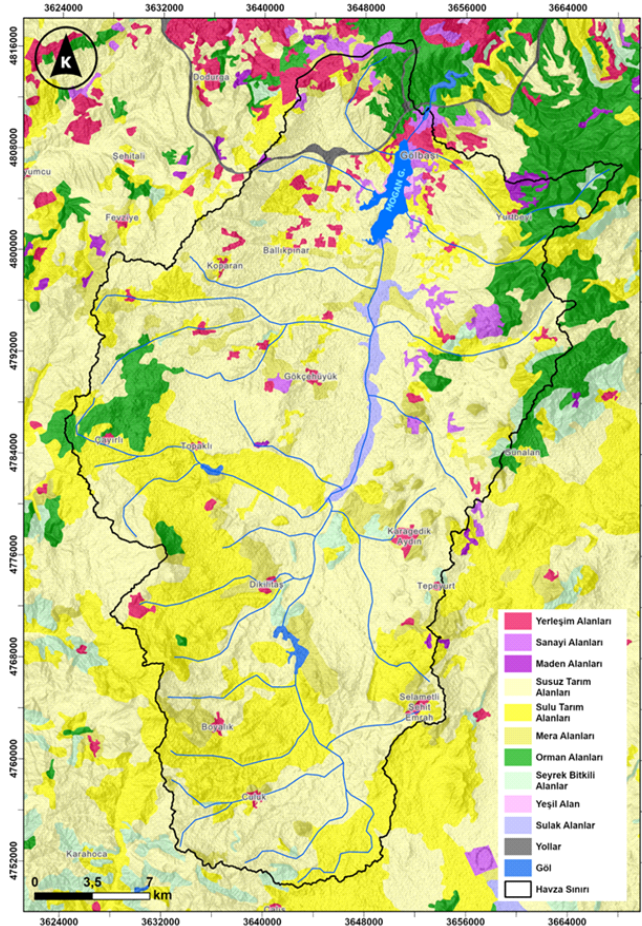
Şekil 3. Göl sedimentlerindeki EF değerlerinin dağılımını gösteren harita.

Figure 3. Map showing the distribution of EF values in the lake sediments.

Antropojenik etki değerlendirmesinde ön plana çıkan antropojenik kaynaklar ile arazi kullanım haritası verileri birbirini desteklemektedir. CORINE 2018 verilerinden yararlanılarak hazırlanan haritaya göre Mogan Gölü havzasında tarım, madencilik başta olmak üzere sanayi alanları ve yerleşme baskın antropojenik faaliyetleri oluşturmaktadır (Şekil 5).

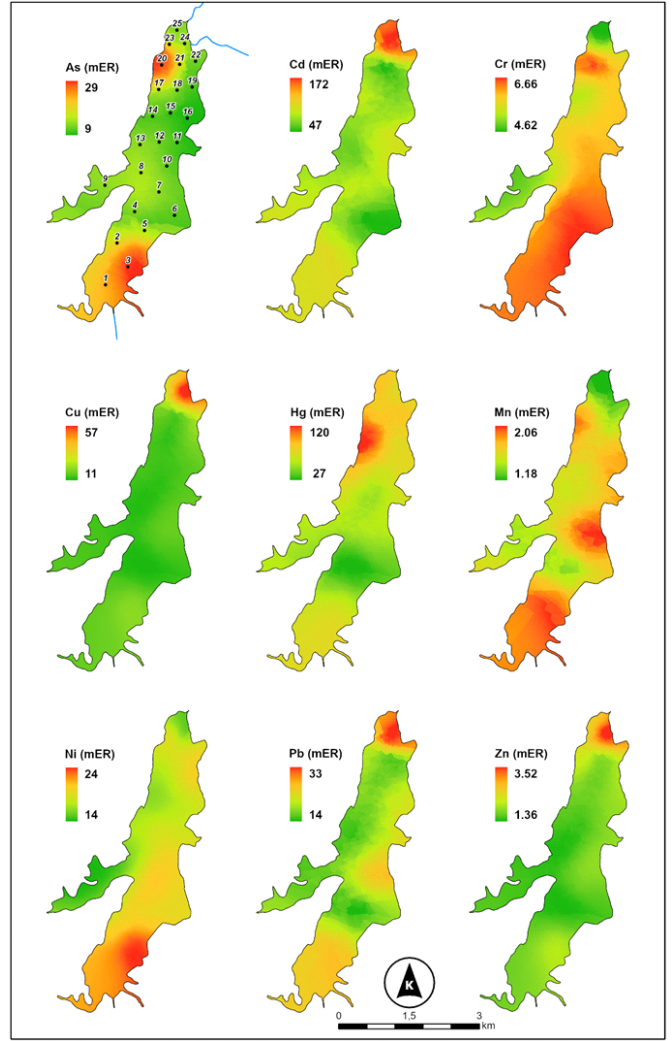
3.3. Ekolojik Risk Analizi

mER değerleri ortalama verilere göre; Cd (83.02) > Hg (61.22) > Pb (18.51) > Ni (18.01) > Cu (16.50) > As (12.95) > Cr (5.79) > Zn (1.75) > Mn (1.54) şeklinde sıralanmaktadır. Ortalama veriler göl genelinde Cd ve Hg'nin orta derece ekolojik risk yarattığını, diğer elementlerin ise ekolojik risk yaratmadığını göstermektedir. Ancak mekânsal analizlere göre; Cd gölün kuzeyinde Gölbaşı ilçesinin merkezine bulunduğu noktada yüksek derecede ekolojik risk yaratmıştır. Cu aynı bölgede orta derecede ekolojik risk yaratmıştır. Hg gölün güneyinde akarsu deşarj olan bölgede ve yerleşimin yoğun olduğu kuzey kesimde önemli derecede ekolojik risk yaratmıştır. Diğer elementler ekolojik risk yaratmamıştır. mER verilerinin mekânsal dağılışı incelendiğinde; ekolojik risk yaratmayan elementlerin maksimum mER değerlerine Gölbaşı ilçe merkezinin bulunduğu güney kesim, kuzey kesim ve göle deşarj olan Gölova, Yavrucak, Başpınar ve Suksen derelerinin ağızlarında ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 6). Bu durum, zenginleşme faktöründe olduğu gibi yerleşme, tarım ve başta maden ocakları olmak üzere havza içi antropojenik kaynakların gölün ekolojik risk seviyesinin yükselmesini tetiklediğini göstermektedir.



Şekil 5. Arazi kullanım haritası.

Figure 5. Land use map.



Şekil 6. mER konsantrasyonlarının mekânsal dağılışı.

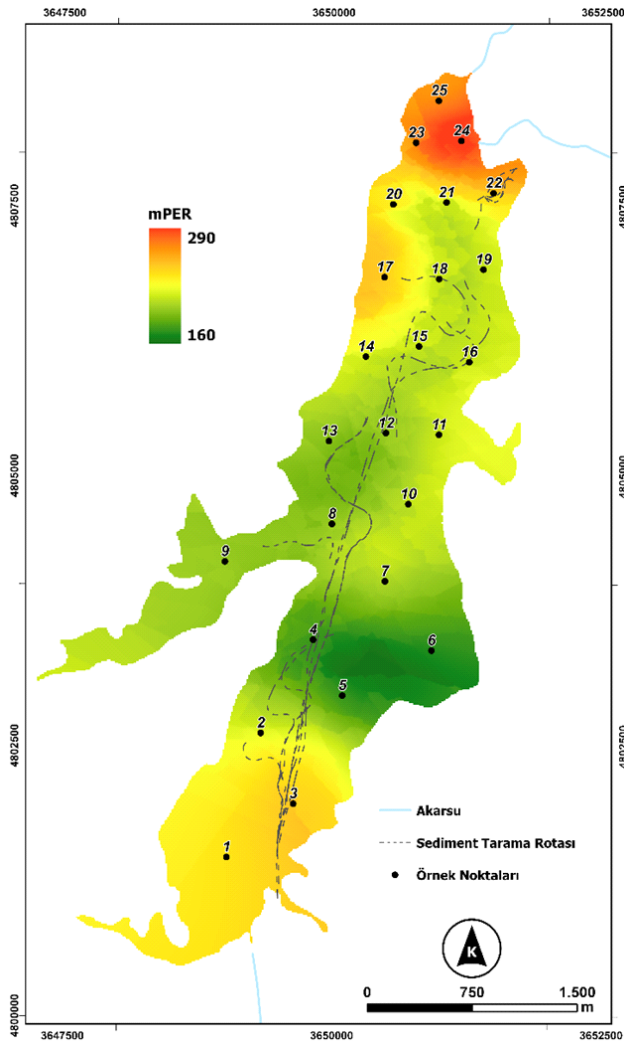
Figure 6. Spatial distribution of mER concentrations.

3.4. Potansiyel Ekolojik Risk Analizi

mPER değerleri 160 – 290 arasında değişmekte olup, ortalama 219'dur. Ortalama değere göre Mogan Gölü'nde orta derecede potansiyel ekolojik risk vardır. Potansiyel ekolojik riskin mekânsal analizi değerlendirildiğinde ekolojik risk akarsu girişleri ve Gölbaşı şehir merkezi yakınlarında artmaktadır (Şekil 7). Mekânsal analizler; Gölbaşı şehir merkezinin ilk kurulduğu bölge yakınında olan sahada orta derecenin en üst seviyesinde ekolojik riske işaret etmektedir. Bu durum, havzadaki kentleşmenin gölün ekolojik risk seviyesini arttırdığını göstermektedir.

3.5. Göldeki Baskın Süreçlerin Belirlenmesi ve Kaynak Analizi

Veri setinin faktör analizine uygunluğunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen KMO örneklem yeterliliği testi (KMO = 0.606748) kabul edilebilir düzeyde bulunmuş, Bartlett küresellik testi ise korelasyon matrisinin birim matris olmadığı hipotezini reddederek (χ^2 , $p < 0.05$) değişkenler arasında anlamlı ortak varyans bulunduğunu göstermiştir. Mogan Gölü yüzey sedimentlerinde gerçekleştirilen faktör analizi, PTE'ler ile organik parametrelerin birlikte değişim örüntülerini ortaya koyarak, bunların olası kaynaklarını ve göldeki çevresel süreçleri anlamaya yardımcı olmaktadır. 2021 yılında 25 farklı istasyondan alınan yüzey sedimenti örneklerine uygulanan faktör analizi sonucunda özdeğeri 1'den büyük üç faktör belirlenmiştir. Bu üç



Şekil 7. Potansiyel ekolojik riskin mekânsal analizi.

Figure 7. Spatial analysis of potential ecological risk.

faktör belirlenmiştir. Bu üç faktör, toplam varyansın yaklaşık %80'ini açıklamaktadır (Faktör 1: %50.07; Faktör 2: %21.08; Faktör 3: %9.01). Aşağıda, döndürülmüş faktör yükleme matrisi ışığında her bir faktör ayrı başlıklar altında incelenerek, yükleme değerlerine dayalı çıkarımlar yapılmış ve bu faktörlerin hangi kirlenici kaynaklara (endüstriyel, tarımsal, kentsel veya doğal jeokimyasal) karşılık geldiği ile göldeki baskın süreçler (doğal ya da antropojenik) tartışılmıştır (Tablo 4).

3.5.1. Faktör 1: Ağırlıklı olarak litolojik kaynaklı elementler ile bazı antropojenik elementlerin ortak taşınımı

Faktör 1, yüksek pozitif yüklemelere sahip PTE'ler ile karakterizedir. Bu faktörde özellikle Ni, Cr, Fe, Al ve Mn (Ni: 0.94; Cr: 0.96; Fe: 0.95; Al: 0.97; Mn: 0.89). Ayrıca As' de bu faktörde anlamlı bir pozitif yükleme göstermektedir (As: 0.61). Bu PTE'lerin bir arada yüksek yük değerlerine sahip olması, bunların jeolojik ve litolojik kaynaklı olduğunu düşündürmektedir. Fe ve Al, kayalarda bol bulunan temel litofil elementlerdendir; sedimente yüksek Fe ve Al yüklerinin yansıması, göle taşınan toprak ve kayalar kökenli malzemeyi ifade eder. Benzer şekilde Ni, Cr ve Mn de bölgenin doğal jeokimyasıyla ilişkili olabilecek metallere; bu elementler çevredeki toprakların ve ana kayaların bileşiminden kaynaklanabilir. Bu nedenle Faktör 1, ağırlıklı olarak doğal jeokimyasal arka planı temsil eden bir bileşen olarak yorumlanmaktadır. Bununla birlikte Cr ve Ni için hesaplan-

Tablo 4. Varimaks rotasyonu sonrası faktör yükleme matrisi.

Table 4. Factor loading matrix after Varimax rotation.

	Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3
Mo	-0.641	-0.264	0.56
Cu	-0.065	0.982	-0.064
Pb	0.533	0.798	-0.051
Zn	0.391	0.903	-0.017
Ni	0.938	0.124	-0.021
Mn	0.893	-0.002	0.067
Fe	0.946	0.266	0.006
As	0.613	0.064	0.018
Cd	0.139	0.883	0.056
P	-0.436	0.575	0.507
Cr	0.964	0.144	-0.095
Al	0.974	0.115	-0.066
Hg	0.198	0.083	0.82
TOC	-0.624	-0.224	0.374
CDP	-0.564	-0.071	0.428

mış olan ortalama zenginleşme faktörü değerleri orta düzeyli zenginleşmeye, bir başka deyişle antropojenik etkiye işaret etmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde bu faktörün içinde doğal elementlerle benzer taşınma yollarını paylaşan iki antropojenik element de katılmıştır. Faktör 1'in tanımladığı metal birikimi, büyük ölçüde doğal süreçlerle ilişkilidir. Yağışlar ve yüzey akışlarıyla göle taşınan erozyon ürünleri (kil ve mil gibi ince taneli sedimentler), beraberlerinde Fe, Al, Ni, Cr, Mn gibi metallerce zengin mineralleri getirmektedir. Bu süreç, göl sedimentinde görülen bu metallerin temel (arka plan) seviyelerini belirler. Cr ve Ni'nin doğal kaynaklı seviyelerinin üzerinde, insan etkisiyle de (ör. geçmiş maden veya sanayi faaliyetleri, eski tarımsal ilaçlar) kısmen yükselmiş olabileceğine işaret eder (Hani & Pazira 2011; Wei Cen 2020).

Faktör 1'de dikkat çeken bir diğer nokta, TOC ve CDP gibi organik belirteçlerin bu faktörle negatif yükleme göstermesidir (TOC: -0.62; CDP: -0.56). Ayrıca Molibden (Mo) da Faktör 1'de belirgin biçimde negatif yüklüdür (Mo: -0.64). Bu ters ilişki, gölde inorganik mineral madde birikimi ile organik madde birikiminin birbiriyle zıt yönlü dağıldığını göstermektedir. Bir başka deyişle, bazı sediment bölgelerinde mineral kökenli malzeme (Fe-Al zengin kil/erozyon malzemesi) fazlayken organik içerik nispeten düşüktür. Bu durum, yoğun erozyon ve tortu girişi olan kesimlerde organik maddelerin seyrelmesiyle açıklanabilir. Örneğin, akarsu girişlerine yakın alanlar bol mineral getirirken, bu alanlarda birim sedimentte organik karbon oranı düşebilir (çünkü organik madde sulandırılmış olur). Buna karşın, gölün daha durgun kesimlerinde veya yüksek biyolojik üretkenliğe sahip bölgelerinde organik madde birikimi fazla iken, mineral içerik görece düşüktür. Mo elementinin de Faktör 1'de negatif yüklenmesi, bu elementin çoğunlukla Faktör 3 ile açıklanan ortamlarda (yani organik maddece zengin, muhtemelen indirgen koşullardaki sedimentte) biriktiğine işaret eder.

3.5.2. Faktör 2: Kentsel / endüstriyel kaynaklı antropojenik PTE kirliliği

Faktör 2, PTE'lerin antropojenik kirliliğini yansıtan bileşendir. Bu faktörde; Cu, Zn, Pb, ve Cd gibi metallerin yükleme değerleri

son derece yüksektir (Cu: 0.98; Zn: 0.90; Pb: 0.80; Cd: 0.88). Bu dört metal genellikle endüstriyel ve kentsel kirlilik kaynakları ile ilişkilendirilir. Örneğin Cu ve Zn, endüstriyel faaliyetlerden ve araç trafiğinden kaynaklanabilir. Pb geçmişte benzine katkı olarak yaygın kullanıldığı için özellikle karayolu trafiği yakınlarında toprak ve sedimentte birikmiştir. Cd ise fosfatlı gübreler ve kanalizasyon yoluyla çevreye girer. Fosfat gübrelerinde Cd bulunabileceği için tarımsal alanlardan gelen yüzey sularında da Cd yükü artabilir. Nitekim Mogan Gölü çevresinde tarım alanlarından ve kentten gelen akışların bu metalleri göle taşıması muhtemeldir. Faktör 2'nin bu dört metaldeki baskınlığı, göl sedimentindeki PTE kirlenmesinin belirgin bir şekilde insan kaynaklı olduğunu göstermektedir.

Bu faktörün kirlenici kaynakları kentsel, endüstriyel ve tarımsal faaliyetler olarak özetlenebilir. Evsel atık sular ve kentsel yüzey akışı, Zn ve Pb başta olmak üzere çeşitli metalleri göle taşıyabilir. Örneğin, şehrsel bölgelerden gelen kanalizasyon veya yağmur suyu akışlarında Zn (çatı ve boyalardan), Pb (eski borular, boyalar), Cu (tesisat, fren tozu) bulunabilir. Mogan Gölü'nün bulunduğu Gölbaşı yöresinde geçmişte göle arıtılmadan bırakılan atık sular olduğuna dair haberler bulunmaktadır. Gölbaşı ilçesinde günümüzde arıtma tesisi yoktur. Atık sular Ankara Büyükşehir Belediyesi Tadar arıtma tesisinde bertaraf edilmektedir. Yapılan bir çalışmada Cu-Cd ve Zn-Pb çiftlerinin göle benzer antropojenik kaynaklardan ulaştığı, yani bu metallerin aynı kirlilik kaynaklarından geldiği tespit edilmiştir (Binici et. al. 2021). Bu durum, Cu ve Cd'nin muhtemelen endüstriyel/domestik atıklarla, Zn ve Pb'nin ise muhtemelen trafik veya sanayi kaynaklı atıklarla ilişkili olduğunu göstermektedir. Faktör 2'de bu metallerin birlikte yüksek yükler sergilemesi, ortak kaynaklı olduklarını doğrular niteliktedir. Bu metallerin doğal ortamda yüksek konsantrasyonlarda bulunması beklenmez; bu nedenle Faktör 2, açık biçimde antropojenik kaynaklı PTE kirliliğini temsil etmektedir.

Faktör 2'de toplam fosfor (P) değişkeninin de orta düzeyde bir pozitif yükü vardır (P: 0.58). Bu ilginç bulgu, besin tuzları (özellikle fosfor) ile PTE kirliliğinin kısmen ortak kaynaklardan gelebileceğini aklı getirmektedir. Örneğin, evsel atık su deşarjları hem fosfor (deterjanlar, insan atıkları) hem de Cu, Zn gibi metalleri içerebilir; benzer şekilde tarımsal akış hem gübre kaynaklı fosfor hem de pestisitlerden/metallerden gelen kirliliği beraber taşıyabilir. Bu nedenle; Faktör 2, kentsel ve endüstriyel kirliliğin yanı sıra tarımsal kirlilik unsurlarını da yansıtmaktadır.

3.5.3. Faktör 3: Organik madde birikimi ve biyojenik süreçler (Besin Girdisi ve Eutrofikasyon)

Faktör 3; göldeki biyolojik üretkenlik, organik madde birikimi ve bunlara eşlik eden özgün elementlerle ilişkilidir. Bu faktörde en yüksek yükleme gösteren değişken Hg olup yük değeri 0.82'dir. Ayrıca Mo (0.56) ve TP (0.51) bu faktörde belirgin pozitif yüklere sahiptir. TOC ve CDP de Faktör 3'te pozitif yüklenmiştir (TOC: 0.37; CDP: 0.43) ancak bunların yük değerleri Hg ve Mo kadar yüksek değildir. Yine de, TOC ve CDP'nin bu faktörde birlikte pozitif yönde yer alması son derece anlamlıdır; çünkü her ikisi de göldeki organik madde birikimi ve birincil üretim düzeyi hakkında bilgi verir. CDP, sedimente gömülen alg kaynaklı organik maddenin göstergesidir – yani geçmişteki fitoplankton (alg) üretiminin sedimente yansıyan izidir. TOC ise genel organik karbon içeriğini verir. Dolayısıyla Faktör 3, yüksek

biyolojik üretkenlik sonucu oluşan organik birikimi temsil eden bir bileşen olarak anlaşılabilir.

Bu faktörün yükleme desenine bakıldığında, göldeki ötrofikasyon ve buna bağlı süreçlerin izleri görülmektedir. Fosfor (P), göllerde birincil üretimi kısıtlayan temel besin elementlerinden biridir ve Mogan Gölü gibi sığ ve eutrofik eğilim gösteren bir sulak alanda genellikle artmış fosfor yükleri alg patlamalarına yol açar. Faktör 3'te P'nin pozitif olması, muhtemelen tarımsal gübrelerden veya evsel atıklardan gelen fosforun sedimente kadar ulaşarak birikmesiyle ilgilidir. Bu besin girdisi, gölde yoğun alg gelişimini (fitoplankton çoğalmasını) tetiklemiş ve ölü alglerin çökmesiyle sedimentte hem TOC hem CDP birikmiştir. Yani, Faktör 3'ün güçlü olduğu bölgeler, organik madde yönünden zengin, muhtemelen gölün üretken kesimleridir. Buralarda alglerin büyüme ve çürüme döngüsü yoğundur ve bu biyojenik süreçler sonucunda sedimentte organik birikim fazladır. Biyolojik ayrışma süreçleri de bu faktör kapsamında önemlidir: Yoğun organik madde çürümesi, sedimentin alt kısımlarında oksijenin tükenmesine (oksijensiz, indirgen koşullar oluşmasına) yol açabilir. Bu durum bazı elementlerin davranışını etkiler. Örneğin; Mo, oksijenli ortamlarda suda çözünür formda kalırken indirgen (anoksik) ortamlarda sülfidlerle bağlanıp çöker; dolayısıyla organik açıdan zengin ve oksijensiz kalabilen sediment bölgelerinde Mo'nun birikmesi beklenir. Nitekim Mo'nun Faktör 3'te pozitif yükü, muhtemelen göldeki anoksik/organik ortam koşullarını temsil etmektedir – yüksek organik madde nedeniyle oluşan oksijensiz mikro-ortamda Mo sedimentte tutulmaktadır.

Hg, Faktör 3'ün önemli bir bileşenidir ve yüksek pozitif yükü dikkat çekicidir. Civa genellikle bölgesel bir kaynakla değil, daha çok atmosferik yolla taşınan yaygın bir kirlenici olarak göl ve okyanus sedimentlerinde bulunur. Fosil yakıtların yakılması, endüstriyel emisyonlar gibi uzak kaynaklar atmosferde civa birikimine yol açar ve civa yağışlarla su kütlelerine taşınarak sedimentte birikir. Mogan Gölü havzasında büyük bir civa kaynağı olmasa da, atmosferik depozisyon yoluyla civa sedimentte toplanmış olabilir. Önemli olan, civanın sedimentte genellikle organik madde ile kuvvetli bağlar yapmasıdır. Organik zengin sediment, civayı bünyesinde tutma eğilimindedir. Bu yüzden Faktör 3 kapsamında civanın ortaya çıkması, organik birikimin yüksek olduğu kesimlerde civa tutulduğunu düşündürür. Bir başka deyişle, civa kirleniciyi esasen antropojenik (insan kaynaklı) olsa da, göl içerisinde bu kirlenicinin dağılımını belirleyen süreç organik madde birikimidir. Civa, plankton ve detritus ile kompleksler oluşturup sedimentte o organik tortuyla birlikte çöküyor olabilir. Bu durum, Faktör 3'ün hem biyojenik hem de dolaylı yoldan antropojenik bir karakter taşıdığını gösterir: Fosfor gibi besinler tarımsal/evsel faaliyetlerden gelerek biyolojik üretimi artırır (antropojenik etki), bunun sonucunda oluşan organik zengin ortam bazı metallerin (Mo, Hg gibi) birikimini etkiler.

Sonuç olarak, faktör analizinin ortaya koyduğu tablo, Mogan Gölü'nde doğal süreçlerle antropojenik etkilerin iç içe geçtiğini ancak antropojenik etkilerin (hem doğrudan kirlenici girişi hem de ötrofikasyon şeklinde) önemli bir rol oynadığını net bir biçimde ortaya sermektedir. Bu bulgular, gölün sürdürülebilir yönetimi için hem kirlenici kaynakların kontrolü (ör. endüstriyel atıkların, kentsel kanalizasyonun arıtılması) hem de besin yüklerinin azaltılması (tarımsal gübre kullanımının yönetimi, atık

su arıtımı) gerektiğine işaret etmektedir. Göldeki çevresel süreçlerin anlaşılması, bu tür önlemlerin planlanmasında kritik öneme sahiptir.

3.5.4. Korelasyon analizi

İlk olarak, Ni, Cr, Al ve Fe arasındaki çok yüksek korelasyon katsayıları ($r > 0.90$, $p < 0.05$), bu elementlerin aynı jeokimyasal fraksiyonda yoğunlaştığını göstermektedir. Bu durum, özellikle Cr–Ni ($r \approx 0.98$) ve Cr–Fe ($r \approx 0.96$) çiftlerinde belirgin olup, bölgede doğal mineralojiye bağlı bir zenginleşmeyi işaret etmektedir. Mn'nin de bu gruba anlamlı şekilde eşlik etmesi (Mn–Ni, Mn–Cr, Mn–Al, Mn–Fe ilişkilerinin tamamı güçlü ve anlamlı) oksit–hidroksit fazlarının önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Buna karşılık, Pb, Zn ve Cu elementleri arasında gözlenen anlamlı ve yüksek korelasyonlar (Pb–Zn $r \approx 0.92$; Cu–Zn $r \approx 0.88$; Cu–Pb $r \approx 0.76$) bu üç metalin ortak antropojenik kaynaklardan veya benzer çevresel süreçlerden etkilendiğini göstermektedir. Bu grup, özellikle şehirleşme, yüzey akışı, atıksu girdileri veya tarımsal drenaj gibi insan kaynaklı yükleri temsil eder niteliktedir. Cd'nin bu gruba eşlik eden anlamlı korelasyonları (Cd–Cu, Cd–Pb, Cd–Zn ilişkileri anlamlıdır) Cd'nin de büyük ölçüde antropojenik karakterli olduğunu desteklemektedir (Tablo 5).

Ayrıca P ile Cu ve Mo arasındaki anlamlı ilişkiler (P–Cu ve P–Mo) fosfor zenginleşmesinin metal birikimiyle ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, üretkenliğin arttığı dönemlerde organik madde birikimine bağlı olarak metallerin partiküllere adsorpsiyonu ve çökmesi süreciyle uyumludur.

TOC ve CDP, yani organik madde ve klorofil bozunma ürünleri, özellikle Mo ile anlamlı düzeyde pozitif ilişkiler göstermiştir. Bu durum, Mo'nun organik madde yönelimli davranarak daha çok yüksek üretkenlik ve organik madde birikimi görülen sedimentlerde zenginleştiğini göstermektedir. Çalışma alanındaki bazı

örneklerde TOC ve CDP'nin Fe, Ni, Cr gibi crustal elementlerle negatif korelasyon göstermesi, organik madde açısından zengin kesimlerin daha düşük mineral içerikli, daha ince taneli sedimentlere karşılık geldiğini düşündürmektedir.

Son olarak, Hg yalnızca sınırlı sayıda anlamlı ilişki göstermiş olup diğer metallerden daha bağımsız davranmaktadır. Bu durum, Hg'nin litolojik kontrol yerine daha çok biyokimyasal ve partikül ilişkili süreçlerle taşındığını ve sedimente farklı mekanizmalarla bağlandığını düşündürmektedir.

4. Sonuç

Çalışma kapsamında elde edilen bulgulara göre; gölün etrafında bulunan yerleşim yerlerinden, tarım arazilerinden ve endüstriyel işletmelerden çıkan atıklar, kimyasal gübre ve ilaçlar göle karışmaktadır. Bunun sonucunda oluşan yüksek PTE ve organik madde konsantrasyonu gölün ötrofikasyon seviyesini artırmaktadır. Oksijen seviyesinin giderek düşmesi de gölde yaşayan canlı ekosistemini tehdit etmektedir. Göl çevresinde artan yerleşim yerleri, ulaşım ağları ve tarımsal faaliyetlerin yoğunlaşması ile antropojenik etkilerin artması gölün sürdürülebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Göl havzasında farklı madenleri çıkaran ve işleyen çok sayıda tesisin bulunması, yeni tesislerin açılması endüstriyel kirliliğin artması açısından önemli bir risktir. Mekansal analizlere göre; sediment tarama işlemi yapılan bölgede PTE konsantrasyonu ve ekolojik risk seviyesinin azaldığı ancak risksiz değerlere gerilemediği görülmektedir. Bu durum, PTE'lerin sucul ekosistemlerden uzaklaştırılmasının ne kadar zor olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, Mogan Gölü'nde ekolojik risk seviyesinin tekrar artmaması için Gölbaşı ilçesinden göle kentsel atık deşarjının denetlenmesi, maden işletmeleri başta olmak üzere tüm endüstriyel tesislere denetimlerin sıklaştırılması, tarım arazilerinde gübre ve pestisit kullanımının denetimli şekilde devam ettirilmesi ve atıksu arıtma tesisi yatırımlarının hızlandırılması gerekmektedir.

Tablo 5. Korelasyon analizi.

Table 5. Correlation analysis.

	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	Mn	Fe	As	Cd	P	Cr	Al	Hg	TOC	CDP
Mo	1	-0,249	-0,575	-0,492	-0,592	-0,552	-0,656	-0,267	-0,263	0,419	-0,683	-0,658	0,138	0,682	0,674
Cu	-0,249	1	0,759	0,880	0,069	-0,076	0,195	0,080	0,816	0,554	0,092	0,049	0,000	-0,170	-0,049
Pb	-0,575	0,759	1	0,922	0,575	0,555	0,693	0,329	0,788	0,142	0,617	0,638	0,113	-0,455	-0,356
Zn	-0,492	0,880	0,922	1	0,491	0,328	0,622	0,313	0,804	0,351	0,523	0,479	0,130	-0,431	-0,309
Ni	-0,592	0,069	0,575	0,491	1	0,785	0,939	0,608	0,236	-0,309	0,978	0,952	0,075	-0,537	-0,515
Mn	-0,552	-0,076	0,555	0,328	0,785	1	0,818	0,337	0,118	-0,361	0,829	0,897	0,219	-0,501	-0,465
Fe	-0,656	0,195	0,693	0,622	0,939	0,818	1	0,588	0,363	-0,243	0,963	0,959	0,189	-0,668	-0,513
As	-0,267	0,080	0,329	0,313	0,608	0,337	0,588	1	0,154	-0,274	0,614	0,575	0,010	-0,421	-0,166
Cd	-0,263	0,816	0,788	0,804	0,236	0,118	0,363	0,154	1	0,341	0,235	0,260	0,149	-0,211	-0,074
P	0,419	0,554	0,142	0,351	-0,309	-0,361	-0,243	-0,274	0,341	1	-0,350	-0,405	0,342	0,203	0,354
Cr	-0,683	0,092	0,617	0,523	0,978	0,829	0,963	0,614	0,235	-0,350	1	0,974	0,057	-0,641	-0,549
Al	-0,658	0,049	0,638	0,479	0,952	0,897	0,959	0,575	0,260	-0,405	0,974	1	0,081	-0,608	-0,527
Hg	0,138	0,000	0,113	0,130	0,075	0,219	0,189	0,010	0,149	0,342	0,057	0,081	1	0,083	0,008
TOC	0,682	-0,170	-0,455	-0,431	-0,537	-0,501	-0,668	-0,421	-0,211	0,203	-0,641	-0,608	0,083	1	0,480
CDP	0,674	-0,049	-0,356	-0,309	-0,515	-0,465	-0,513	-0,166	-0,074	0,354	-0,549	-0,527	0,008	0,480	1

Çıkar Çatışması/Conflict of Interest: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması yaşamadıklarını beyan ederler./ *The author declare that they have no conflicting interest.*

Etik Kurulu Onayı/ Ethics Committee Approval: Bu çalışma için Etik Kurul Onay Belgesi gerekmemektedir. / *Ethics Committee Approval is not required for this study.*

Yazar Katkısı/Author contribution: Çalışma konsepti ve tasarımı Ş.F. - D.A. ve İ.C tarafından yapılmıştır. Ş.F. – S.K. ve M.P. tarafından veriler toplanmış ve yorumlanması yapılmıştır. İlk yazım kısmı Ş.F. tarafından yapıp daha sonradan S.K vr İ.C tarafından da okunmuş, en son gerekli düzeltmeler Ş.F. ve D.A. tarafından yapılmıştır. / *The study concept and design were created by Ş.F., D.A., and İ.C. Data was collected and interpreted by Ş.F. – S.K. and M.P. The initial writing was done by Ş.F., later reviewed by S.K. and İ.C., and final corrections were made by Ş.F. and D.A.*

Katkı Belirtme /Acknowledgements: Bu proje Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2020/072 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Destekleri için Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi'ne teşekkür ederiz. / *This project was supported by the Balıkesir University Scientific Research Project Unit under project code 2020/072. We thank the Balıkesir University Scientific Research Project Unit for their support.*

Veri Erişebilirliği/Data: Arazi kullanım türü verileri için Çevresel Bilginin Koordinasyonu (CORINE) envanterinden <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download> bağlantısı ile yararlanılmıştır. / *For land use type data, the Coordination of Environmental Information (CORINE) inventory was used with the link <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>.*

Kaynakça

- Ali, M. M., Ali, M. L., Bhuyan, M., Islam, M., Rahman, M. S., Alam, M., Das, M., Mustary, S. & Islam, N. (2022). Spatio-temporal variation and toxicity of trace metals in commercially important fish of the tidal Pasur River in Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(26), 40131-40145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-022-18821y>
- Amankwaa, G., Yin, X., Zhang, L., Huang, W., Cao, Y., Ni, X., & Gyimah, E. (2021). Spatial distribution and eco-environmental risk assessment of heavy metals in surface sediments from a crater lake (Bosomtwe/Bosumtwi), *Environmental Science and Pollution Research*, (28), 19367–19380, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12112-0>
- Aykir, D., Fural, Ş., Kükrer, S., & Mutlu, E.Y. (2023). Elements based ecological and human health risks assessment in a lagoon in a densely populated basin, *Oceanological and Hydrobiological*, 52(1), <https://doi.org/10.26881/oahs-2023.1.01>
- Barcelona Convention. (1976). *Convention for the Protection of the Mediterranean Sea against Pollution*. UNEP/MAP.
- Benzer, S., Arslan, H., Uzal, N., Gül, A., & Yılmaz, M. (2013). Con-

- centrations of metals in water, sediment and tissues of *Cyprinus carpio* L., 1758 from Mogan Lake (Turkey). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 12(1), 45-55.
- Binici, A. & Pulatsü S. (2022). Ecological risk assessment of heavy metals after dredging in Mogan Lake, Turkey. *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39(3), 197-205. <https://doi.org/10.12714/egejfas.39.3.04>
- Binici, A., Pulatsü, S., & Bursa, N. (2021). Mogan Gölü'nde (Ankara, Türkiye) sediment tarama uygulamalarının sedimentteki ağır metal konsantrasyonları açısından değerlendirilmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Marine Sciences and Fisheries*, 4(2), 159-167. <https://doi.org/10.46384/jmsf.987343>
- Brady, J. P., Ayoko, G. A., Martens, W. N., & Goonetilleke, A. (2015). Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments. *Environmental Monitoring Assessment*, 187(306), 5-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4563-x>
- Benzer, S., Arslan, H., Uzel, N., Gul, A., and Yılmaz, M. (2013). Concentrations of metals in water, sediment and tissues of *cyprinus carpio* L., 1758 from Mogan Lake (Turkey). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 12(1), 44–55. <https://doi.org/10.22092/ijfs.2018.114260>
- CORINE. (2018). *CORINE Land Cover*. European Environment Agency. <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>
- Duman, F. & Aksoy, A. & Demirezen, D. (2007). Seasonal variability of heavy metals in surface sediment of Lake Sapanca, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, (133), 277–283.
- Fural, Ş., & Kükrer, S. (2021). Sulak alanlarda potansiyel toksik element (PTE) kaynaklı bölgesel ekolojik risk araştırmalarında kullanılan analitik metotlar. *Türk Coğrafya Dergisi*, (77), 211-222. <https://doi.org/10.17211/tcd.930273>
- Fural Ş., Kükrer S., Cürebal İ., & Aykır D. (2021). Spatial distribution, environmental risk assessment, and source identification of potentially toxic metals in Atıkhisar dam, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, (193), 268, 10-16. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09062-6>
- Gaudette, H., Flight, V., Toner, L., & Folger, D. (1974). An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *Journal of Sedimentary Research* (44), 249-253.
- Gül, A. Benzer, S, Saylar, Ö., Gül, G., & Yılmaz, M. (2017). Mogan Gölü balık faunası. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1), 91-103. <https://doi.org/10.25092/baunfbid.321040>
- Hani, A., & Pazira, E. (2011). Heavy metals assessment and identification of their sources in agricultural soils of Southern Tehran, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, (176), 677-691. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1612-3>
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 8(14), 975–1001.
- Haqaea, M., Niloya, N.M., Khirul, A., Alam, F., & Tareq, M.S. (2021). Appraisal of probabilistic human health risks of heavy metals in vegetables from industrial, non-industrial and arsenic contaminated areas of Bangladesh. *Heliyon*, 7 (2) .

- 7(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06309>
- İslam, M. S., İslam, A. R. M. T., Phoungthong, K., Ustaoglu, F., Tokatli, C., Ahmed, R., Ibrahim, K. H., & Idris, A. M. (2022). Potentially toxic elements in vegetable and rice species in Bangladesh and their exposure assessment. *Journal of Food Composition and Analysis*, (106), 104350. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104350>
- İnandık, H. (1965). *Türkiye gölleri (Morfolojik ve hidrografik özellikleri)*. İstanbul Üniversitesi, Coğrafya Enstitüsü Yayınları.
- Jaskuła, J., & Sojka, M. (2022). Assessment of spatial distribution of sediment contamination with heavy metals in the two biggest rivers in Poland. *Catena*, (211), 1-13 <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105959>
- Jaskuła, J., Sojka, M., Fiedler, M., & Wrozyński, R. (2021). Analysis of spatial variability of river bottom sediment pollution with heavy metals and assessment of potential ecological hazard for the Warta River, Poland. *Minerals*, 11 (3), 2 – 20. <https://doi.org/10.3390/min11030327>
- Köse, E., Emiroğlu, Ö., Çiçek, A., Aksu, S., Başkurt, S., Tokatlı, C., Şahin, M., & Uğuluoğlu, A. (2020). Assessment of Ecologic Quality in Terms of Heavy Metal Concentrations in Sediment and Fish on Sakarya River and Dam Lakes, Turkey. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 29, 292 – 303. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1705755>
- Kumar, S., İslam, A. R. M. T., Hasanuzzaman, M., Salam, R., İslam, S. M., Khan, R., Rahman, M. S., Pal, S. C., Ali, M. M. & Idris, A. M. (2022). Potentially toxic elemental contamination in Wainivesi River, Fiji impacted by gold-mining activities using chemometric tools and SOM analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (28), 42742-42767. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18734-w>
- Kumral, R., Yazıcı, Ö. (2024). Ankara'nın Gölbaşı İlçesinde Yerşekilleri Üzerindeki Antropojenik Etkiler. *Coğrafya Dergisi*, (49), 155-173. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2024-1523354>
- Küçükosmanoğlu, A. G., & Filazi, A. (2020). Investigation of the metal pollution sources in Lake Mogan, Ankara, Turkey. *Biological Trace Element Research*, (198), 269–282. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02031-z>
- Kükrer, S., Çakır Ç., Kaya H., & Erginal A.E. (2019). Historical record of metals in Lake Küçükçekmece and Lake Terkos (İstanbul, Turkey) based on anthropogenic impacts and ecological risk assessment. *Environmental Forensics*, 20(4), 3 8 5 - 4 0 1 . <https://doi.org/10.1080/15275922.2019.1657985>
- Kükrer, S. & Erginal, A. E. & Şeker, S. ve Karabıyıkoglu, M. (2015). Distribution and Environmental Risk Evaluation of Heavy Metal in Core Sediments from Lake Çıldır (NE Turkey). *Environmental Monitoring Assessment*, 180 (453), 2-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4685-1>
- Kükrer, S. (2018). Vertical and horizontal distribution, source identification, ecological and toxic risk assessment of heavy metals in sediments of Lake Aygır, Kars, Turkey. *Environmental Forensics*, 19 (2) 122-133. <https://doi.org/10.1080/15275922.2018.1448905>
- Lahn, E. (1948). Türkiye Göllerinin Jeolojisi ve Jeomorfolojisi Hakkında Bir Etüt. Maden Tetkik Ve Arama Enstitüsü Yayınları, Ankara.
- Lorenzen, C. (1971). Chlorophyll-degradation products in sediments of Black Sea. *Woods Hole Oceanographic Institution Contribution*, 28, 426-428.
- MacDonald, D., Ingersoll, C., & Berger, T. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for fresh- water ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39, 20 - 31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
- Mutlu, E., & Kurnaz A. (2018). Assessment of physicochemical parameters and heavy metal pollution in Çeltik Pond water. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 47(6), 1185 – 1192.
- Muller, G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 2, 108–118.
- Özkan, E. Y., Fural, Ş., Kükrer, S., & Büyükişık, H. B. (2022). Seasonal and spatial variations of ecological risk from potential toxic elements in the southern littoral zone of İzmir Inner Gulf, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research* (29), 62669–62689. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19987-1>
- Proshad, R., Kormoker, T., & İslam, S. (2021). Distribution, source identification, ecological and health risks of heavy metals in surface sediments of the Rupsa River, Bangladesh. *Toxin Reviews*, 40, 77-101. <https://doi.org/10.1080/15569543.2018.1564143>
- Sutherland, R. A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu. *Hawaii. Environmental Geology*, 39, 611–627.
- Şimşek, A., Özkoç, H. B., & Bakan, G. (2021). Environmental, ecological and human health risk assessment of heavy metals in sediments at Samsun-Tekkeköy, North of Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 2009-2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15746-w>
- Taş, B., Tepe, Y., Ustaoglu, F., & Alptekin S. (2019). Benthic algal diversity and water quality evaluation by biological approach of Turnasuyu Creek, NE Turkey. *Water Treatment and Desalination*. 155, 404-417. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24225>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. (1995). The geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, (33), 241-265.
- Tokatlı, C., & Varol, M. (2021). Variations, health risks, pollution status and possible sources of dissolved toxic metal(loid)s in stagnant water bodies located in an intensive agricultural region of Turkey, *Environmental Research*, 201, 111571. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111571>
- Tomlinson, D., Wilson, J., Harris, C., & Jeffrey, D. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters*, (33), 566–575.
- Töre, Y., Ustaoglu, F., Tepe, Y. & Kalipci, E. (2021). Levels of toxic metals in edible fish species of the Tigris River (Turkey); threat to public health. *Ecological Indicators*, 123, 107361. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107361>
- Turekian, K., and Wedepohl, K. (1961). Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *GSA Bulletin*, (72), 175-192.
- Uğurlu, Ö. (2020). Gölbaşı özel çevre koruma bölgesi ekosistem hizmetlerinin Ankara kenti için öneminin değerlendirilmesi. *Ankara Araştırmaları Dergisi*, 8, 23-48, <https://doi.org/10.5505/jas.2020.46338>

- Ustaoglu, F., Islam, 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(597), 4-15. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09838-1>
- Ustaoglu, F., Tepe, Y. & Aydin, H. (2020). Heavy metals in sediments of two nearby streams from Southeastern Black Sea coast: Contamination and ecological risk assessment. *Environmental Forensics*, 21(2), 145-156. <https://doi.org/10.1080/15275922.2020.1728433>
- Varol, M., & Sünbül, M.R. (2020). Macroelements and toxic trace elements in muscle and liver of fish species from the largest three reservoirs in Turkey and human risk assessment based on the worst-case scenarios. *Environmental Research*, 184, 109298. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109298>
- Walkley, A., & Black, I. (1934). An examination of the Degthareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 27, 29-38.
- Wei, J., & Cen K. (2020). Assessment of human health risk based on characteristics of potential toxic elements (PTEs) contents in foods sold in Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 703, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134747>
- Yavuz, H., & Filazi, A. (1995). Ankara Mogan Gölü'nden sağlanan su, çökelti ve balık örneklerinde ağır metal düzeyleri. *Veteriner Hekim Derneği Dergisi*, 66, 1-7.
- Zahraa, A., Hashmib, M.Z., Malika, R. N. & Ahmed, Z. (2014). Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah—Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan. *Science of the Total Environment*, 470, 925-933. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.017>
- Zhang, G., Bai, J., Zhao, Q., Lu, Q, Jia, J., & Wen, X. (2016). Heavy metals in wetland soils along a wetland-forming chronosequence in the Yellow River Delta of China: Levels, sources and toxic risks. *Ecological Indicators*. 69, 331-339. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.042>