



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.10.2024
Kabul Tarihi : 02.12.2024

Received Date : 07.10.2024
Accepted Date : 02.12.2024

SAKARYA GEYVE BÖLGESİ DERE SEDİMANLARININ AĞIR METAL İÇERİKLERİ: OLASI ZENGİNLEŞME VE KİRLENME KAYNAKLARI

HEAVY METAL CONTENTS OF STREAM SEDIMENTS IN THE SAKARYA-GEYVE REGION: POTENTIAL ENRICHMENT AND CONTAMINATION SOURCES

Mustafa Haydar TERZİ^{1*} (ORCID: 0000-0003-4224-6482)

Mehmet Barış DURGUN² (ORCID: 0000-0003-3598-1921)

Gökhan DEMİRELA¹ (ORCID: 0000-0001-8260-8914)

¹ Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

² Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Kuzeybatı Anadolu Bölge Müdürlüğü, Balıkesir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mustafa Haydar TERZİ, mhaydarterzi@aksaray.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin yaş meyve ve sebze üretiminde önemli bir yere sahip olan Geyve (Sakarya) bölgesindeki yerleşim, tarım ve orman alanlarındaki dere sedimanlarının ağır metal içeriklerini analiz etmektir. Böylece bölgede zenginleşme ya da kirlenme anomalisine sahip alanlar tespit edilerek, bu zenginleşmelerin veya kirlenmelerin olası jeojenik ve antropojenik kökenli süreçlerden kaynaklanıp kaynaklanmadığı araştırılmaktadır. Bu kapsamda drenaj sistemlerinden 133 adet dere sedimanı örneği alınmış ve As, Co, Cu, Ni, Pb, V ve Zn içerikleri ICP-OES cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Jeobirikim indeksi hesaplamalarına göre dere sedimanı örneklerinde As ve V açısından kirlilik gözlenmezken, Co, Cu, Pb ve Zn açısından kirlenmemiş-orta seviyede, Ni açısından kirlenmemiş-orta seviyeden orta-yüksek seviyeye değişen derecelerde kirlenmelerin varlığı ortaya konulmuştur. Kirlenme derecesi ve modifiye edilmiş kirlenme derecesi indekslerine göre ise bazı örneklerde orta derecede kirlenme belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler çalışma alanındaki Co ve Ni zenginleşmelerinin serpantin, Pb zenginleşmelerinin granit ve cevherli zonlardan ayrışma ile türediğini ve dolayısıyla jeojenik kökenli olduğunu göstermiştir. Ni açısından bazı örneklerde ek olarak tarımsal faaliyetler sonucunda da ortaya çıkan antropojenik girdilerin varlığı belirlenmiştir. Çalışma alanındaki Cu ve Zn zenginleşmelerinin ise büyük çoğunlukla tarımsal faaliyetler ile ilişkili olarak antropojenik kökenli olarak geliştiği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geyve, ağır metal, antropojenik, dere sedimanı, jeojenik

ABSTRACT

The aim of this study is to analyze the heavy metal contents of stream sediments in the residential, agricultural, and forest areas of Geyve (Sakarya) region, which holds a significant place in Türkiye's fresh fruit and vegetable production. The areas with enrichment/contamination anomalies in the region are identified, and it is investigated whether these enrichment or contamination are caused by geogenic or anthropogenic processes. Within this scope, 133 stream sediment samples were collected from drainage systems, and the contents of As, Co, Cu, Ni, Pb, V, and Zn were determined using ICP-OES. Based on the geoaccumulation index, no pollution was observed for As and V, while Co, Cu, Pb, and Zn showed pollution levels ranging from unpolluted to moderate, and Ni exhibited pollution levels ranging from unpolluted-moderate to moderate-high. Some samples exhibit moderate pollution in the degree of contamination and the modified degree of contamination index. The evaluations indicate that Co and Ni enrichments are derived from serpentin, while Pb enrichments from the weathering of granite and ore-bearing zones, suggesting that geogenic origin. In addition, the presence of anthropogenic inputs resulting from agricultural activities was identified in some samples for Ni. The enrichments of Cu and Zn were mostly determined to be anthropogenic origin, primarily associated with agricultural activities.

ToCite: TERZİ, M.H., DURGUN, M.B., & DEMİRELA, G., (2025). SAKARYA GEYVE BÖLGESİ DERE SEDİMANLARININ AĞIR METAL İÇERİKLERİ: OLASI ZENGİNLEŞME VE KİRLENME KAYNAKLARI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 334-349.

Keywords: Geyve, heavy metal, anthropogenic, stream sediment, geogenic

GİRİŞ

Yeryuvarının oluşumundan itibaren gerçekleşen jeolojik süreçlerin yanında günümüz teknolojik gelişmeleri, sanayileşme, hızlı nüfus artışı, yapılaşma ve plansız kentleşme, tarım alanlarının verimsiz kullanımı, hammaddeye olan talebin günden güne hızla büyümesine bağlı olarak artan madencilik faaliyetleri gibi birçok faktör sonucunda hem jeojenik hem de antropojenik kökenli olarak ortaya çıkabilen ağır metaller ve oluşturdukları kirlilikler çevre ve insanlık için her geçen gün giderek daha ciddi bir sorun haline gelmektedir (Terzi & Kalkan, 2024; Demirela vd., 2020; Ateş vd., 2017; Ravankhah vd., 2017; Esmaceli vd., 2014; Chen vd., 2009). Adsorpsiyon ve iyon değişimi ile ortamda birikebilen ve uzaklaştırılması oldukça zor olan ağır metaller, bitkiler tarafından özümşenerek bitki bünyesine geçer (Çelenk & Kızıloğlu, 2015; Kızıloğlu Algan & Bilen, 2005). Böylece metabolik fonksiyonları ve büyümesi olumsuz etkilenen organizma en nihayetinde ölür. Bu türden ağır metal kontaminasyonuna maruz kalmış bitkilerin tüketilmesiyle hayvan ve insanların bünyesine geçebilen ağır metaller zamanla ciddi sağlık problemlerine neden olabilir (Isleyen vd., 2019; Ok, 2008). Ağır metaller çevresel kalıcılıkları, toksisiteleri ve besin zincirine dahil olma kabiliyetleri nedeniyle önemli çevresel kirleticiler olarak kabul edilirler (Duman vd., 2007). Dolayısıyla besin zincirinin korunmasında oldukça kritik öneme sahip olmakla birlikte ağır metallere kaynak ve hazne görevi gören hava, su, toprak ve sedimanların gelecek nesiller için periyodik olarak dikkatle izlenmesi zorunludur.

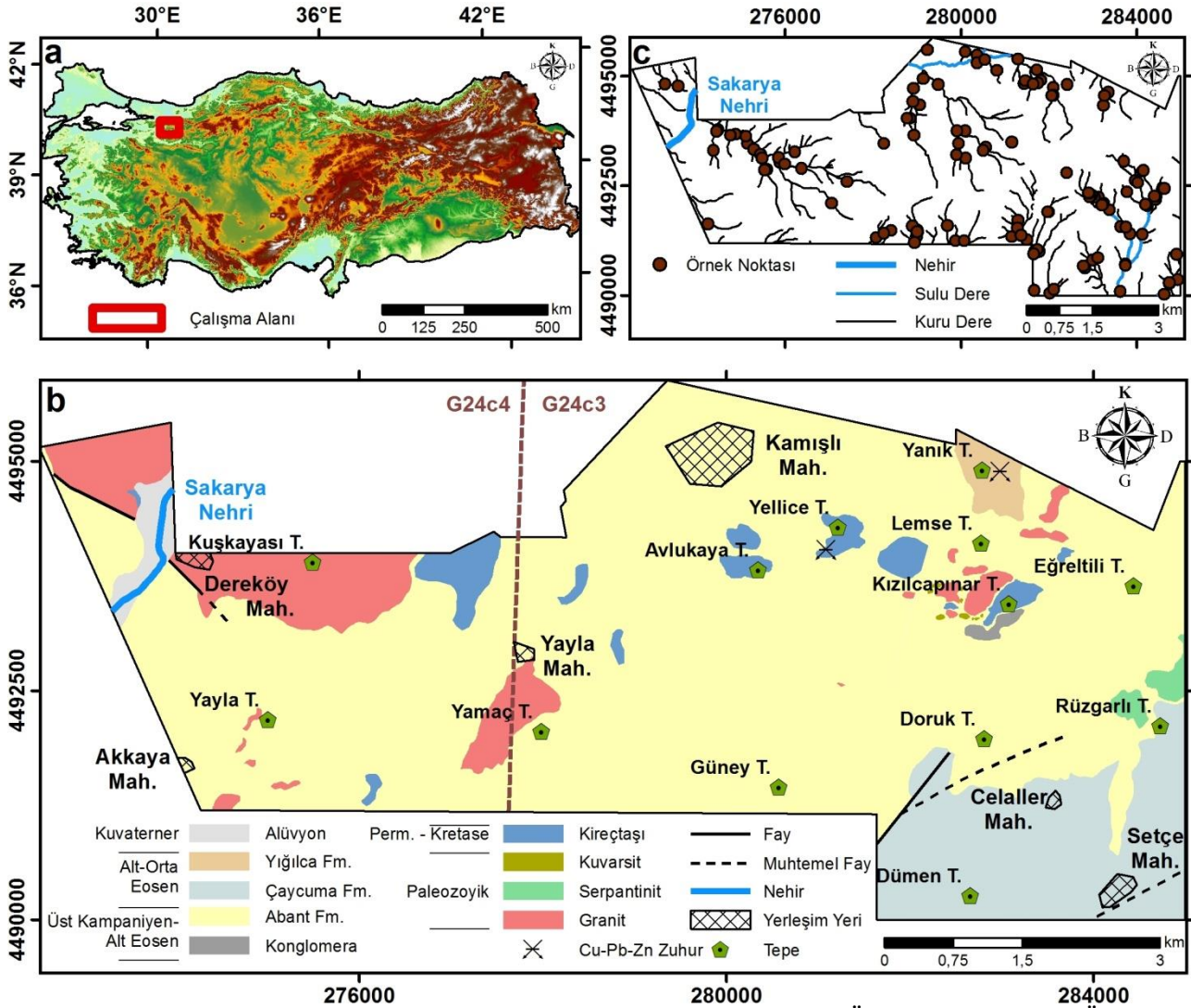
Literatürde Sakarya ili ve çevresindeki toprak ve dere sedimanlarında ağır metaller açısından zenginleşme/kirlenme seviyelerini ve potansiyel kirlilik kaynaklarını belirlemeye yönelik yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur (Durgun vd., 2024a, b, c; Parlak vd., 2020; Isleyen vd., 2019; Çelenk & Kızıloğlu, 2015; Isen vd., 2013; Dundar vd., 2012; Ok, 2008; Duman vd., 2007; Sisman vd., 2002). Ancak bu çalışmaların bir kısmı geniş alanlarda (bölgesel) az sayıdaki örneğin jeokimyasal analiz sonuçlarını kapsamakta, bir kısmı ise son derece sınırlı alanlar (lokal) üzerinde ağır metaller açısından değerlendirmeleri içermektedir. Çelenk ve Kızıloğlu (2015) Sakarya-Erenler'de D-100 karayolu kenarı topraklarındaki Pb birikiminin karayolundan dikey yönde uzaklaştıkça azaldığını ve hâkim rüzgâr yönünün birikim üzerindeki etkisini vurgulamıştır. Duman vd. (2007) Sapanca Gölü'ne ait yüzey sedimanlarında yaz aylarında Cr, Cu, Mn, Ni ve Zn'nun, sonbahar aylarında Cd'un en yüksek seviyelere ulaştığını ve Pb açısından ise mevsimsel olarak bir zenginleşmenin olmadığını ifade etmiştir. Dundar vd. (2012) Aşağı Sakarya Nehri Havzası'na ait sedimanların ağır metal içeriklerini (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn) 10 ay boyunca düzenli dönemlerde 10 farklı istasyonda takip ederek, BCR metodu ile analiz etmiştir. Isen vd. (2013) Sapanca Gölü kuzeyinde D-100 karayolu boyunca toprakların en çok Zn, Pb, Mn, Fe ve Cr elementleri açısından kirlendiğini ve bu kirliliğe araçlardan salınan egzoz gazı emisyonlarının neden olduğunu vurgulamıştır. Ok (2008) ve Isleyen vd. (2019) Geyve bölgesindeki 5 toprak örneğinde polisiklik aromatik hidrokarbonlar ve Cu, Cr, Ni açısından bazı örneklerin belirlenen sınır değerleri aştığını ve ağır metal kirliliği için önlemler alınması gerektiğini belirtmiştir. Sisman vd. (2002) Sapanca Gölü güneyinde Kınalı-Sakarya Karayolu'nun kenarındaki lokasyonlarda her iki ayda bir farklı mesafelerden aldıkları toprak örneklerindeki Ni içeriklerinin dünya standartlarından düşük, Pb birikimlerinin ise kabul edilebilir sınır değerlerinin üzerinde olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmalar günümüzde canlı yaşamının sağlıklı bir şekilde sürdürülebilmesi için ülkemiz açısından özellikle yaş meyve ve sebze üretiminde önemli bir yere sahip olan Geyve (Sakarya)'de ağır metal içerikleri açısından bir araştırmanın yapılması gerekliliğine işaret etmektedir. Bu doğrultuda yapılan çalışma ile Geyve'nin kuzeydoğusunda yerleşim, tarım ve orman alanlarını kapsayan çalışma alanından derlenen dere sedimanı örneklerine ait ağır metal içeriklerinin (As, Co, Cu, Ni, Pb, V ve Zn) belirlenerek bölgede zenginleşme/kirlenme anomalisi gösteren alanların tespit edilmesi ve bunların oluşum nedenlerinin araştırılması amaçlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma Alanının Tanıtılması

Çalışma alanı, Türkiye'nin kuzeybatısında Sakarya ilinin yaklaşık 38 km güneyindeki Geyve ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 1a). İlçenin yüzölçümünün yaklaşık %60'unu ormanlar oluşturmaktadır. Toplam nüfusun %70'i tarımla uğraşmaktadır. 2015 yılında tarla bitkileri üretimi 52.840 ton, sebze bitkileri üretimi 40.264 ton ve meyve üretimi 194.835 ton olmuştur. En çok üretilen tarım ürünleri azalan sırayla, elma, ayva, üzüm, domates, buğday, soğan, kiraz ve şeftalidir (Sakarya İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2015). Türkiye yaş meyve ve sebze üretiminin yaklaşık %10-15'lik kısmı Geyve bölgesinde üretilmektedir (Isleyen vd., 2019). İlçe merkezinin 12 kilometre kuzeydoğusunda yer alan çalışma alanı, Adapazarı G24c3 ve G24c4 paftalarının içerisinde yaklaşık 46 km²'lik bir

alan kapsamaktadır. Çalışma alanı sınırları içerisindeki yerleşim merkezleri Akkaya, Dereköy, Yayla, Kamışlı, Celaller ve Setçe Mahalleleridir (Şekil 1a ve 1b).



Şekil 1. Çalışma Alanının a. Konumunu, b. Jeoloji Haritasını (Durgun, 2024; Özer vd., 2021) ve c. Örnekleme Noktalarını Gösterir Harita.

Akdeniz ikliminin hâkim olduğu bölgedeki en düşük ortalama sıcaklıklar (4-8 °C) Ocak ayında gerçekleşirken, en yüksek ortalama sıcaklıklara Ağustos ayında (28,6 °C) ulaşılır. Bütün aylar yağışlı olmakla birlikte en çok yağış kış aylarında bölgeye düşer. Yıllık yağış miktarı 565,3 mm'dir. Akdeniz iklimine göre yaz aylarında rastlanan yağış fazlalığı Sakarya vadisi boyunca iç kesimlere sokulan Karadeniz bölgesi iklimiyle ilgilidir (Geyve Belediyesi, 2024). Çalışma alanındaki yükselti genel olarak batıdan doğu-kuzeydoğuya doğru artmaktadır. Önemli yükseltilere Yayla (710 m), Kuşkayası (410 m), Yamaç (1110 m), Avlukaya (970 m), Güney (1010 m), Yellice (1194 m), Yanık (1073 m), Lemse (1227 m), Kızılcapınar (1384 m), Doruk (1087 m), Dümen (747 m), Eğreltili (1319 m) ve Rüzgarlı (946 m) Tepeleri örnek olarak verilebilir. Bölgenin drenaj sistemi içerisinde 160 adet kuru ve 5 adet sulu dere yer alırken, alanın en kuzey batı kesiminden ise Sakarya Nehri geçmektedir (Şekil 1c).

Çalışma Alanının Jeolojisi

Çalışma alanı, Ketin (1966) tarafından tanımlanan Pontidler'in batı kesiminde yer almaktadır. Bölgede Armutlu-Almacık Zonu'na (Pamukova Metamorfileri ve Abant Formasyonu) ve İstanbul Zonu'na (Çaycuma ve Yığılca Formasyonları) ait kayalar yüzylemektedir (Erturaç, 2018). Bölgenin temelini temsil eden Pamukova metamorfileri, çalışma alanında yüzlek vermemekte olup, düşük dereceli metamorfizma izleri taşıyan farklı türde kırıntılı, karbonat ve volkanik kayalardan oluşmaktadır (Çelik vd., 2009). Bu kayalar Paleozoyik yaşlı granitik intrüzyonlar tarafından kesilmektedir (Okay vd., 2008). Bu kayaların üzerine açılacak uyumsuzlukla çalışma alanında oldukça yaygın olarak gözlenen Üst Kampaniyen-Alt Eosen yaşlı Abant Formasyonu gelmektedir (Özer

vd., 2013). Abant Formasyonu, esas olarak konglomera, kumtaşı, çamurtaşı, marn gibi çeşitli sedimanter kayalardan oluşmaktadır. İçerisinde yer yer farklı yaşlarda ve olistostromal filiş karakterinde çok değişik boyutlarda (haritalanabilir ve haritalanamaz ölçekte) ve türde kayaç blokları (granit, serpantinit, kuvarsit, kireçtaşı, konglomera) içermektedir (Göllü, 2019; Erturaç, 2018; Temur & Aksay, 2002; Şekil 1b). Abant Formasyonu, esas olarak sedimanter kayalar ile temsil edilen ve içerisinde yer yer aglomera ve tuf ara seviyelerine de rastlanan Çaycuma Formasyonu tarafından uyumsuz olarak üzerlenmektedir (Şekil 1b). Çalışma alanının güneydoğusunda yüzlek veren Çaycuma Formasyonu konglomera, sarımsı-açık kahverengi renkli kumtaşı, gri renkli silttaşı, sarımsı-bej renkli kiltası, marn ve Nummulites fosilli kireçtaşlarından oluşmaktadır. Fosil içeriği Alt-Orta Eosen'de çökme yaşına işaret etmektedir (Erturaç, 2018). Çalışma alanının kuzeydoğusunda Yanık Tepe çevresinde gözlenen Alt-Orta Eosen yaşlı Yığılca Formasyonu koyu gri-kızılımsı renkli aglomera, tuf ve andezitler ile temsil edilmektedir (Şekil 1b; Göllü, 2019). Birim içerisinde yer yer volkanojenik kumtaşları ve Nummulites fosilli marn ara katmanları da gözlenmektedir (Erturaç, 2018; Özer vd., 2013). Çaycuma Formasyonu ile geçişli bir ilişki sunan Yığılca Formasyonu, yaklaşık 150 metre kalınlığa sahiptir (Temur & Aksay, 2002). Tüm bu kayaç birimleri Kuvaterner yaşlı birbirine tutturulmamış sedimanlar tarafından stratigrafik olarak örtülmektedir.

Örnekleme ve Analizler

Örnekleme çalışmalarına başlamadan önce çalışma alanı içerisindeki drenaj ağı çıkartılmış, derelerin akış yönleri, çatalanmaları, uzunlukları ve durumları (kuru veya sulu) dikkate alınarak dere sedimanı örnekleme noktalarının konumları belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında drenaj sistemlerinden toplam da 133 adet dere sedimanı örneği alınmıştır (Şekil 1c). Her örnek noktasında el tipi GPS yardımıyla koordinatlar alınmış, dere yatağının memba ve mansap kısımları fotoğraflanmış, jeolojik açıklamalar ve varsa olası antropojenik girdi sağlayacak kaynakların (yerleşim, yol, tarımsal alan vb) detayları not edilmiştir. Sahadan kürekler yardımıyla alınan örnekler plastik poşetlere konularak DS kodu ile etiketlenmiş, kirlenme koşullarına dikkat edilerek temiz bir ortamda kurutulmuş ve 77 mikron (200 mesh) boyutlu paslanmaz çelik elekten elendikten sonra öğütülerek toz haline getirilmiştir. Örneklerin jeokimyasal analizleri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknoloji Dairesi Başkanlığı Laboratuvarlarında modifiye edilmiş kral suyunda çözme işlemi uygulandıktan sonra İndüktif Eşleşmiş Plazma Atomik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dere sedimanı örnekleri As, Co, Cu, Ni, Pb, V ve Zn olmak üzere 7 ağır metal için analiz edilmiştir. Cihazın dedeksiyon limitleri As ve Cu için 3 ppm, Co, Ni, Pb ve V için 5 ppm ve Zn için 2 ppm olarak raporlanmıştır. Dedeksiyon limitlerinin altında kalan değerler daha sonraki hesaplamalarda ve değerlendirmelerde kullanılmak amacıyla yarıya bölünmüştür.

İndeks Hesaplamaları

Dere sedimanı örneklerinin ağır metaller açısından zenginleşme/kirlenme seviyelerini belirlemek ve bunların oluşturmuş olabileceği ekolojik riski değerlendirmek amacıyla çeşitli kirlilik indeks hesaplama sistemleri literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gopal vd., 2024; Durgun vd., 2024a, b, c; Terzi & Kalkan, 2024; Bai vd., 2023; Kalkan & Terzi, 2023; Ochiagha vd., 2020; Özkul vd., 2018; Ravankhah vd., 2017; Esmaili vd., 2014; Stoffers vd., 1986). Bu indeks sistemleri ilgili örneğin jeokimyasal özelliklerinden yararlanarak çok sayıda ağır metale ait verileri kullanarak tekil bir sonuç değeri hesaplamakta ve kendi sınıflandırma sistemleri yardımıyla ekolojik değerlendirme yapılmasına olanak sağlamaktadır (Yılmaz & Terzi, 2023). Bu çalışmada, dere sedimanı örneklerine ait ağır metallerin kirlilik riski seviyelerini değerlendirmek amacıyla jeobirikim (Igeo; Müller, 1969), kirlenme derecesi (C_d ; Hakanson, 1980), modifiye edilmiş kirlenme derecesi (mC_d ; Abraham & Parker, 2008), ekolojik toprak kirlilik indeksi (ESPI; Yılmaz & Terzi, 2023) ve kirlilik yük indeksi (PLI; Tomlinson vd., 1980) olmak üzere beş farklı indeks hesaplama sistemi kullanılmıştır. Kirlilik indekslerinin hesaplama formülleri ve sınıflandırma sistemleri Tablo 1'de verilmiştir. Her indeks hesaplaması sırasında değerlendirmesi yapılan ilgili ağır metale karşılık gelen ve kirlenmemiş veya bozulmamış özellikler ile temsil edilen bir jeolojik referans değerine (üst kıta kabuğu, alt kıta kabuğu, şeyl vb.) ihtiyaç duyulur. Bu çalışma kapsamında yapılan hesaplamalarda yerkabuğunun en üst seviyesini temsil eden, ince tane boyutları bakımından zengin olan ve herhangi bir kirlilik göstermeyen (sanayileşme öncesi değerleri temsil eden) ortalama şeyl değeri kullanılmıştır (Terzi & Kalkan, 2024; Kalkan & Terzi, 2023; Şener & Şener, 2015; Abraham & Parker, 2008; Reimann & Caritat, 1998; Koljonen, 1992). Ortalama şeyl değeri As için 13 ppm, Co için 20 ppm, Cu için 45 ppm, Ni için 70 ppm, Pb için 22 ppm, V için 130 ppm ve Zn için 100 ppm'dir (Reimann & Caritat, 1998; Koljonen, 1992).

Igeo indeksi, jeojenik ve antropojenik etkilerin ağır metal içeriğini jeolojik referans değere göre nasıl etkilediğini değerlendirir. Formülündeki 1,5 katsayısı litolojik değişimlere (Gopal vd., 2024; Abraham & Parker, 2008; Stoffers vd., 1986) veya antropojenik aktivitelere (Bai vd. 2023; Kalkan & Terzi, 2023; Ochiagha vd. 2020) atfedilebilir. Formülündeki C_n/B_n oranı, örnekte ölçülen ağır metalin karşılık gelen referans değerine bölünmesini ifade eder.

Igeo, ağır metal kirlilik seviyelerini kirlenmemişten çok yükseğe kadar olmak üzere yedi sınıfta değerlendirir (Tablo 1; Abraham & Parker, 2008; Müller, 1969). C_d indeksi, ağır metal içeriklerini düşükten çok yükseğe kadar değişen dört kategoride sınıflandırarak değerlendirir. C_d ilgili örnekteki her ağır metal içeriğinin sanayi öncesi referans değerine bölünmesiyle elde edilen kirlilik faktörünün (C_f^i) toplanmasıyla hesaplanır (Tablo 1; Hakanson, 1980). C_d indeksi Abraham ve Parker (2008) tarafından mC_d olarak yeni bir hesaplama ve sınıflandırma sistemine dönüştürülmüştür. Bu indeks sisteminde C_d 'den farklı olarak tüm ağır metaller için hesaplanan C_f^i değerlerinin toplamı, analiz edilen ve hesaplamalara katılan ağır metal sayısına (n) bölünür. mC_d kirlenmemiş-çok düşükten ultra yükseğe kadar değişen yedi sınıfta kirlilik seviyesini değerlendirir (Tablo 1; Abraham ve Parker, 2008). AHP tabanlı bir indeks sistemi olan ESPI, örnekteki çok sayıda ağır metal değerini hesaplamaya dâhil ederek tek bir indeks skoru

Tablo 1. Kirlilik İndekslerine ait Hesaplama Formülleri ve Sınıflandırma Sistemleri

İndeks	Denklemler	Aralık	Kirlilik Sınıfı	Kaynak
Igeo	$Igeo = \log_2 (C_n / (1.5 \times B_n))$	≤ 0	Kirlenmemiş	[1, 2]
	Cn: Ağır metal konsantrasyonu	0-1	Kirlenmemiş-orta	
	Bn: İlgili ağır metalin referans değeri	1-2	Orta	
		2-3	Orta-yüksek	
		3-4	Yüksek	
		4-5	Yüksek-çok yüksek	
		>5	Çok yüksek	
C_d	$C_d = \sum C_f^i$	<8	Düşük	[3]
	$C_f^i = (C_{0-1}^i / C_n^i)$	8-16	Orta	
	C_f^i : Kirlilik faktörü	16-32	Yüksek	
	C_{0-1}^i : Ağır metal konsantrasyonu	≥ 32	Çok yüksek	
	C_n^i : İlgili ağır metalin referans değeri			
mC_d	$mC_d = \sum C_f^i / n$	<1.5	Kirlenmemiş- çok düşük	[2]
	C_f^i : Kirlilik faktörü	1.5-2	Düşük	
	n: Analiz edilen ağır metal sayısı	2-4	Orta	
	i: i. ağır metal	4-8	Yüksek	
		8-16	Çok yüksek	
		16-32	Oldukça yüksek	
		≥ 32	Ultra yüksek	
ESPI	$ESPI = \sum W_m * P_{fi}$	<1	Kirlenmemiş	[4]
	$P_{fi} = (M_i / S_{vm}) * (M_i / (\sum M_n))$	1-3	Düşük	
	W_m : M ağır metalinin ağırlık değeri; bu çalışma da 1 olarak kullanılmıştır.	3-5	Orta	
	P_{fi} : i alternatifi için kirlilik faktörü	>5	Yüksek	
	M_i : i alternatifi için M ağır metalinin değeri			
	S_{vm} : İlgili ağır metalin referans değeri			
	M_n : M ağır metali değerlerinin toplamı			
n: Ağır metal sayısı				
m: Herhangi bir ağır metal				
PLI	$PLI = \sqrt[n]{(CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)}$	<1	Kirlilik yok	[5]
	$CF = C_{\text{ağır metal değeri}} / C_{\text{referans değeri}}$	>1	Kirlilik var	
	CF: Kirlilik faktörü			
	n: Kirlilik faktörlerinin sayısı			

[1]: Müller (1969); [2]: Abraham ve Parker (2008); [3]: Hakanson (1980); [4]: Yılmaz ve Terzi (2023); [5]: Tomlinson vd. (1980)

hesaplar. Kirlilik seviyesini ise kirlenmemişten yükseğe kadar değişen dört sınıfta değerlendirir (Tablo 1; Yılmaz & Terzi, 2023). PLI, ilk olarak örnekteki bir ağır metal içeriğini o ağır metal için referans değerine oranı olan kirlilik faktörünü (CF) hesaplar. Daha sonra n sayıda CF'nin birbiriyle çarpılmasıyla elde edilen değer, hesaplamada kullanılan ve toplam ağır metal sayısını temsil eden sayısal değere göre kökü alınır. Sonuçta üretilen PLI değeri 1'in üzerindeyse, çalışılan yerin sedimanının kirliliği, 1'in altındaysa kirlenmemiş olduğu kabul edilir (Tablo 1; Özkul vd., 2018; Tomlinson vd., 1980).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Jeokimya

Çalışma alanından derlenen 133 adet dere sedimanı örneğinin ağır metal içeriklerine ait tanımlayıcı istatistiksel bilgiler Tablo 2'de sunulmaktadır. Buna göre As 1,5 ile 9 ppm, Co 2,5 ile 51 ppm, Cu 9 ile 106 ppm, Ni 10 ile 750 ppm, Pb 2,5 ile 37 ppm, V 9 ile 61 ppm ve Zn 5 ile 170 ppm arasında değerlere sahiptir. Dere sedimanı örnekleri ortalama olarak ise 3,5 ppm As, 14,4 ppm Co, 25,8 ppm Cu, 134,5 ppm Ni, 8,1 ppm Pb, 31,5 ppm V ve 46,9 ppm Zn içermektedir. Dere sedimanı örneklerine ait ağır metal içerikleri, üst kıtasal kabuk (Wedepohl, 1995), şeyl ve dünya toprak (Reimann & Caritat, 1998; Koljonen, 1992) ortalama değerleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2). Bazı dere sedimanı örnekleri As içerikleri açısından üst kıtasal kabuk ve dünya toprak, V içerikleri üst kıtasal kabuk, Co, Cu, Ni, Pb ve Zn açısından üst kıtasal kabuk, şeyl ve dünya toprak ortalama değerlerine göre zenginleşme göstermektedir (Şekil 3).

Dere sedimanı örneklerinin tamamı As açısından şeyl ortalama değerinin (13 ppm) altında değerlere sahip iken, 29 adet örnek dünya toprak (5 ppm) ve 69 adet örnek üst kıtasal kabuk ortalama değerine (2 ppm) göre daha yüksek değerlere sahiptir (Şekil 2). Örnekler içerisindeki en yüksek As içeriği (DS-30, 87, 97, 102 ve 128: 9 ppm) sırasıyla üst kıtasal kabuk ve dünya toprak ortalama değerlerine göre yaklaşık 4,5 ve 1,8 kat zenginleşme göstermiştir. Dünya toprak ortalama değerine göre zenginleşen örnekler çalışma alanının özellikle orta-batı kesiminde yoğunlaşmaktadır. Yayla ve Dereköy mahallelerinin çevresindeki örnekler Abant Formasyonu ve granit birimleri ile ilişkili gözlenirken, Kamışlı Mahallesi doğru daha doğudaki örnekler Abant Formasyonu, Celaller Mahallesi güneybatısındaki örnekler ise Çaycuma Formasyonu ile ilişkili gözlenmektedir (Şekil 3a ve 3h). Dere sediman örneklerinden 13 adedi Ok (2008) ve Isleyen vd. (2019)'nin Geyve kuzey-kuzeydoğusundan aldığı topraklara ait en yüksek değerlerin biraz üzerinde As değerlerine sahip iken, geri kalan örnekler ise benzer değer aralıkları sergilemektedir (Tablo 3).

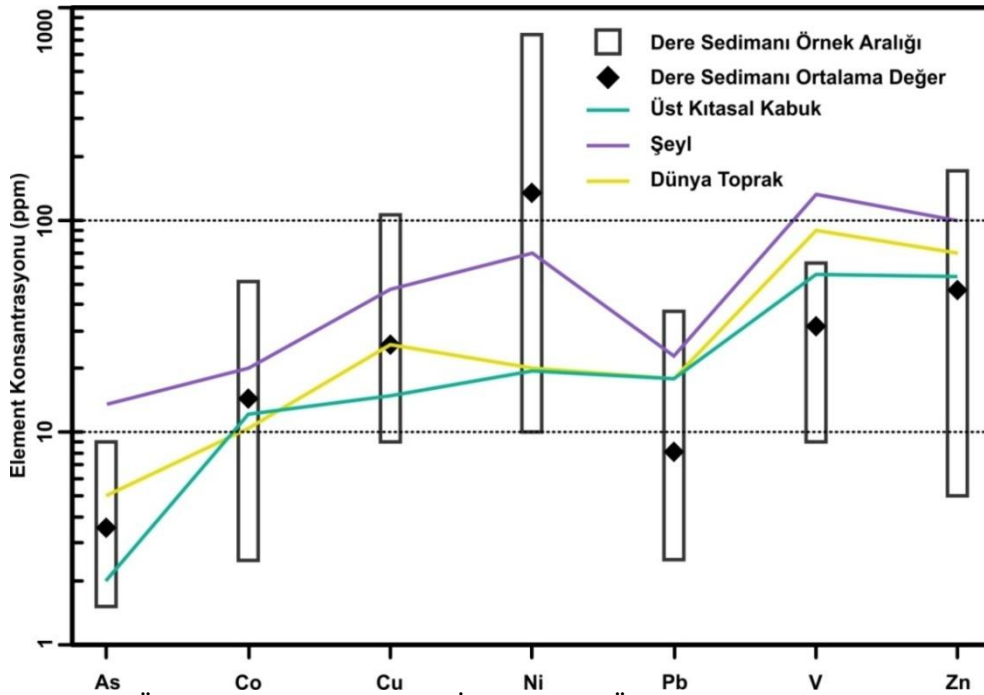
Co açısından dere sedimanı örneklerinden 16 adedi şeyl (20 ppm), 94 adedi üst kıtasal kabuk (11,6 ppm) ve 104 adedi dünya toprak ortalama değerine (10 ppm) göre daha yüksek değerlere sahiptir (Şekil 2). Örnekler içerisindeki en yüksek Co içeriği (DS-42: 51 ppm) sırasıyla üst kıtasal kabuk, şeyl ve dünya toprak ortalama değerlerine göre yaklaşık 4,4, 2,6 ve 5,1 kat zenginleşme göstermiştir. Şeyl ortalama değerlerine göre zenginleşen örnekler çalışma alanında Yayla Mahallesi-Yamaç Tepe güneydoğusunda Abant Formasyonu, Celaller Mahallesi kuzeydoğusu-Rüzgârlı Tepe kuzeybatısında Abant Formasyonu ve serpantin birimlerine karşılık gelmektedir (Şekil 3b ve 3h). Çalışma alanındaki dere sedimanı örneklerinin 11 adedi Isen vd. (2013) tarafından Sapanca Gölü kuzeyindeki D-100 karayolu kenarından alınan topraklar ile Dundar vd. (2012) tarafından Sakarya Nehri kuzey bölümünden alınan sedimanlara ait Co içeriklerine kıyasla daha yüksek değerlere sahiptir (Tablo 3).

Cu açısından dere sedimanı örneklerinden 9 adedi şeyl (45 ppm), 47 adedi dünya toprak (25 ppm) ve 123 adedi üst kıtasal kabuk ortalama değerine (14,3 ppm) göre daha yüksek değerlere sahiptir (Şekil 2). Örnekler içerisindeki en yüksek Cu içeriği (DS-86: 106 ppm) sırasıyla üst kıtasal kabuk, şeyl ve dünya toprak ortalama değerlerine göre yaklaşık 7,4, 2,4 ve 4,2 kat zenginleşme göstermiştir. Şeyl ortalama değerlerine göre zenginleşen örnekler çalışma alanında Yayla ve Dereköy mahallelerinin çevresinde Abant Formasyonu ve granit birimleri, Kamışlı Mahallesi doğru daha doğuda Abant Formasyonu ve kireçtaşı birimleri ile ilişkili gözlenmektedir (Şekil 3c ve 3h). Bazı dere sedimanı örneklerinin Cu içerikleri, Sapanca Gölü (Duman vd., 2007) ve Sakarya Nehri sedimanları (Dundar vd., 2012) ile Isen vd. (2013)'nin bölge toprakları için belirttiği Cu değerlerinden yüksektir (Tablo 3). Bununla birlikte örneklerin Cu içerikleri, Geyve kuzey-kuzeydoğusunda alınan toprakların bakır içerikleri ile de büyük ölçüde uyumludur (Tablo 3; Isleyen vd., 2019; Ok, 2008).

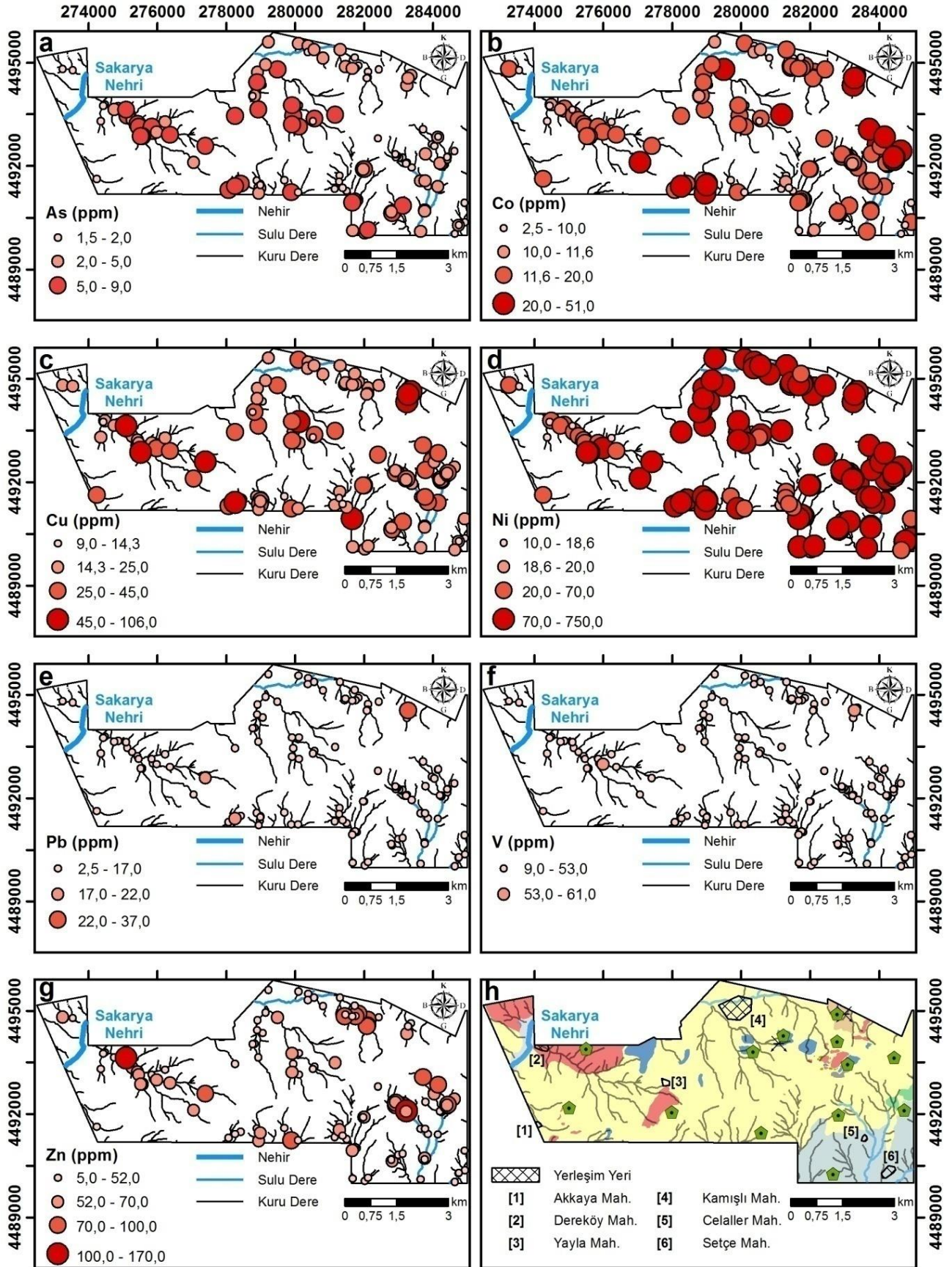
Ni açısından dere sedimanı örneklerinden 99 adedi şeyl (70 ppm), 125 adedi dünya toprak (20 ppm) ve 126 adedi üst kıtasal kabuk ortalama değerine (18,6 ppm) göre daha yüksek değerlere sahiptir (Şekil 2). Örnekler içerisindeki en yüksek Ni içeriği (DS-42: 750 ppm) sırasıyla üst kıtasal kabuk, şeyl ve dünya toprak ortalama değerlerine göre

Tablo 2. Dere Sedimanı Örneklerinin Jeokimyasal Analiz Sonuçlarına ait Tanımlayıcı İstatistikler ve Jeolojik Referans Değerler

	As	Co	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Kaynak
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
Minimum	1,5	2,5	9,0	10,0	2,5	9,0	5,0	Bu Çalışma
Maksimum	9,0	51,0	106,0	750,0	37,0	61,0	170,0	
Ortalama	3,5	14,4	25,8	134,5	8,1	31,5	46,9	
Standart Sapma	2,23	5,95	13,18	95,83	5,16	10,28	21,76	
Çarpıklık	0,64	1,82	2,78	2,48	1,44	0,31	1,63	
Basıklık	-0,66	9,98	11,66	12,29	6,01	-0,25	6,61	
Örnek Sayısı	133							
Üst Kıtasal Kabuk	2	11,6	14,3	18,6	17	53	52	Wedepohl (1995)
Şeyl	13	20	45	70	22	130	100	Koljonen (1992);
Dünya Toprak	5	10	25	20	17	90	70	Reimann ve Caritat (1998)

**Şekil 2.** Dere Sedimanı Örneklerine ait Ağır Metal İçeriklerinin Üst Kıtasal Kabuk (Wedepohl, 1995), Şeyl ve Dünya Toprak (Reimann & Caritat, 1998; Koljonen, 1992) Ortalama Değerleri ile Karşılaştırılması

yaklaşık 40,3, 10,7 ve 37,5 kat zenginleşme göstermiştir. Şeyl ortalama değerlerine göre Ni açısından zenginleşen örnekler çalışma alanında Abant Formasyonu ile ilişkili olarak geniş bir yayılım göstermektedir. Bununla birlikte en yüksek Ni değerleri Rüzgârlı Tepe civarında mostra veren serpantinit birimlerinin içerisinde elde edilmiştir. Bunların yanında çalışma alanının güneydoğusuna doğru Çaycuma Formasyonu üzerinde gözlenen yüksek Ni değerlerinin daha kuzeyde akarsu drenaj sisteminin içerisinde geçtiği Abant Formasyonu ve serpantinit birimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 3d ve 3h). Çalışma alanındaki dere sedimanı örneklerinin 17 adedindeki Ni içerikleri, literatürde Sakarya çevresindeki toprak ve sediman örneklerine ait raporlanan en yüksek Ni içeriklerinden (Isleyen vd., 2019; Ok, 2008) oldukça yüksek değerlere sahiptir (Tablo 3).



Şekil 3. Dere Sedimanı Örneklerine ait Ağır Metal İçeriklerinin Mekânsal Dağılım Haritaları: a. As, b. Co, c. Cu, d. Ni, e. Pb, f. V ve g. Zn (Ağır Metallerle ait Sınıf Aralıkları, Üst Kıtasal Kabuk, Şeyl ve Dünya Toprak Ortalama Değerlerine Göre Belirlenmiştir), h. Çalışma Alanının Jeoloji Haritası (Lejant için Şekil 1'e Bakınız)

Tablo 3. Bu Çalışmaya ait Analiz Sonuçları ile Literatürde Sakarya İli Çevresinde Yapılan Araştırmalara ait Ağır Metal İçerik Sonuçlarının Karşılaştırılması

Lokasyon (Örnek Türü) [Kaynak]	As	Co	Cu	Ni	Pb	V	Zn
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Geyve Kuzeydoğusu (Sediman) [1]	1,5-9,0	2,5-51	9-106	10-750	2,5-37	9-61	5-170
Sapanca Gölü (Sediman) [2]	-	-	17,28-35,51	20,10-34,31	12,94-17,80	-	39,02-75,31
Geyve Kuzey-Kuzeydoğusu (Toprak) [3]	3,24-6,62	-	24,52-108,18	89,06-219,88	3,95-21,10	-	54,95-149,58
Sakarya Nehri (Sediman) [4]	-	21,21	37,54	82,96	41,31	-	76,67
Sapanca Gölü Kuzeyi (Toprak) [5]	-	21,92	69,42	47,70	227,60	20,72	229,07
Sapanca Gölü Güneyi (Toprak) [6]	-	-	-	0-58,67	0-47,54	-	-

[1]: Bu Çalışma; [2]: Duman vd. (2007); [3]: Ok (2008); Isleyen vd. (2019); [4]: Dundar vd. (2012); [5]: Isen vd. (2013); [6]: Sisman vd. (2002)

Pb açısından dere sedimanı örneklerinden 1 adedi şeyl (22 ppm), 3 adedi ise üst kıtasal kabuk ve dünya toprak ortalama değerlerine (17 ppm) göre daha yüksek değerlere sahiptir (Şekil 2). Örnekler içerisindeki en yüksek Pb içeriği (DS-17: 37 ppm) sırasıyla şeyl ve üst kıtasal kabuk-dünya toprak ortalama değerlerine göre yaklaşık 1,7 ve 2,2 kat zenginleşme göstermiştir. Şeyl ortalama değerine göre en yüksek Pb içeren örnek çalışma alanının kuzeydoğusunda Yanık Tepe'nin güneydoğusunda Cu-Pb-Zn içeren cevherli zuhurlara yakın bir lokasyonda Abant Formasyonu ve granitlerin içerisinde geçtiği drenaj sisteminden alınmıştır. Üst kıtasal kabuk ve dünya toprak ortalama değerlerine göre daha yüksek olan iki örnek (DS-97 ve 130) ise benzer litolojik ilişkilerle birlikte Yayla Mahallesi-Yamaç Tepe çevresinde bulunmaktadır (Şekil 3e ve 3h). Dere sedimanı örneklerinin Pb içerikleri literatürdeki bazı toprak ve dere sedimanı içerikleriyle büyük ölçüde uyumlu olup (Duman vd., 2007; Ok, 2008; Isleyen vd., 2019), Dundar vd. (2012) ve Sisman vd. (2002)'nin sediman ve toprak örneklerinde rapor ettiği değerlere göre nispeten biraz daha düşük, ancak Isen vd. (2013)'nin karayolu kenarından alınan topraklara ait Pb içeriklerinden ise önemli ölçüde daha düşük değerlere sahiptir (Tablo 3).

Dere sedimanı örneklerinin tamamı V içerikleri açısından şeyl (130 ppm) ve dünya toprak (90 ppm) ortalama değerlerinin altında değerlere sahip iken, 2 adet örnek (DS-17 ve 125) üst kıtasal kabuk ortalama değerine (53 ppm) göre daha yüksek değerlere sahiptir (Şekil 2). Örnekler içerisindeki en yüksek V içeriğine sahip örnek (DS-125: 61 ppm) üst kıtasal kabuk ortalama değerine göre yaklaşık 1,2 kat zenginleşme göstermiştir. Bahse konu olan iki örnek çalışma alanında birbirlerinden farklı lokasyonlarda Abant Formasyonu ve granitlerin içerisinde geçtiği drenaj sisteminden alınmıştır (Şekil 3f ve 3h). Bunlara ek olarak dere sedimanı örneklerinden 116 adedi Isen vd. (2013)'nin topraklarına ait V değerinin üzerinde değerlere sahiptir (Tablo 3).

Zn açısından dere sedimanı örneklerinden 2 adedi şeyl (100 ppm), 17 adedi dünya toprak (70 ppm) ve 46 adedi üst kıtasal kabuk ortalama değerine (52 ppm) göre daha yüksek değerlere sahiptir. Örnekler içerisindeki en yüksek Zn içeriğine sahip örnek (DS-128: 170 ppm) sırasıyla üst kıtasal kabuk, şeyl ve dünya toprak ortalama değerlerine göre yaklaşık 3,3, 1,7 ve 2,4 kat zenginleşme göstermiştir. Şeyl ortalama değerine göre 2 örnekte (DS-55 ve 128) gözlenen en yüksek Zn içerikleri çalışma alanında birbirlerinden farklı lokasyonlarda Abant Formasyonu ve granitlerin içerisinde geçtiği drenaj sisteminden alınmıştır. Bununla birlikte dünya toprak ortalama değerine göre zenginleşen örnekler ise benzer litolojik-drenaj ilişkisinde özellikle çalışma alanının batısı ve doğu-kuzeydoğusunda bulunmaktadır (Şekil 3g ve 3h). Dere sedimanı örneklerinin Zn içerikleri literatürdeki bazı toprak ve dere sedimanı içerikleriyle büyük ölçüde uyumlu iken (Isleyen vd., 2019; Dundar vd., 2012; Ok, 2008; Duman vd., 2007), Isen vd. (2013)'nin karayolu kenarından alınan topraklara ait Zn içeriklerinden önemli ölçüde daha küçük değerlere sahiptir (Tablo 3).

Igeo İndeksi

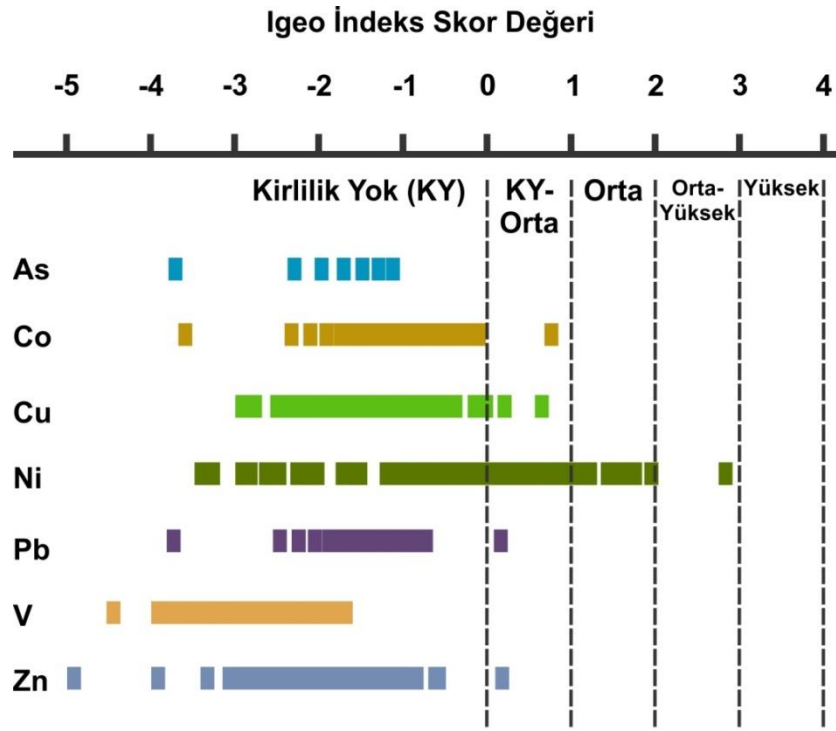
Çalışma alanından derlenen 133 adet dere sedimanı örneğinin ağır metal içerikleri baz alınarak hesaplanan Igeo indeks sonuçlarına ait tanımlayıcı istatistiksel bilgiler Tablo 4'de sunulmaktadır. Igeo hesaplamalarının sonuçları As için -3,7 ile -1,1, Co için -3,6 ile 0,8, Cu için -2,9 ile 0,7, Ni için -3,4 ile 2,8, Pb için -3,7 ile 0,2, V için -4,4 ile -1,7

ve Zn için -4,9 ile 0,2 arasında değişmektedir. Igeo indeks sınıflarına göre dere sedimanı örnekleri As ve V açısından kirlilik göstermemektedir (Tablo 1; Şekil 4).

Igeo'ya göre Co açısından 1 örnek (DS-42) kirlenmemiş-orta derecede kirlenmiş sınıfında yer alırken, aynı zamanda nikel açısından orta-yüksek derecede kirlenmeye sahiptir. Bu örnek çalışma alanında Celaller Mahallesi kuzeydoğusu-Rüzgârlı Tepe kuzeybatısında Abant Formasyonuna ait sedimanter ve 1 metreye kadar blok boyutlarına ulaşan serpantinitle ait kayaların gözlemlendiği dereden alınmıştır (Şekil 5a ve 5h). Örnek lokasyonu çevresinde antropojenik girdileri sağlayacak unsurların olmayışı ve Co'nun yanında Ni kirliliğinin varlığı, gerçekleşen zenginleşmelerin serpantinitle ilişkili olarak jeojenik kökenli olduğunu düşündürmektedir.

Tablo 4. Dere Sedimanı Örneklerinin Igeo İndeks Hesaplamalarına ait Tanımlayıcı İstatistikler

	Igeo As	Igeo Co	Igeo Cu	Igeo Ni	Igeo Pb	Igeo V	Igeo Zn
Minimum	-3,7	-3,6	-2,9	-3,4	-3,7	-4,4	-4,9
Maksimum	-1,1	0,8	0,7	2,8	0,2	-1,7	0,2
Ortalama	-2,8	-1,2	-1,5	0,0	-2,3	-2,7	-1,8
Standart Sapma	0,95	0,66	0,59	1,14	1,02	0,51	0,69
Çarpıklık	0,15	-1,28	0,69	-0,89	-0,31	-0,60	-0,73
Basıklık	-1,70	3,99	1,41	1,01	-1,22	0,40	2,68
Örnek Sayısı	133						



Şekil 4. Dere Sedimanı Örneklerinin Igeo Sınıfları

Igeo Cu sonuçları 2 örnek (DS-86 ve DS-130) için kirlenmemiş-orta derecede kirlenme gösterirken, bu örneklerden DS-130 aynı zamanda Ni açısından kirlenmemiş-orta derecede kirlenmeye de sahiptir. DS-86 numaralı örnek Kamışlı Mahallesi güneyinde-Avlukaya Tepe batısındaki Abant Formasyonuna ait sedimanter ve kireçtaşı mostralının gözlemlendiği dere içerisinde alınmıştır. DS-130 numaralı örnek ise Yayla Mahallesi güneybatısında Abant Formasyonu ve granit birimleri içerisinde geçen dere yatağından alınmış olup, örnek lokasyonunun yakın çevresinde evsel ve tarımsal faaliyetler sürdürülmektedir (Şekil 5b ve 5h). Dolayısıyla DS-130 numaralı örnek lokasyonunda ortaya çıkan Cu zenginleşmesi, evsel atıklar ve çevredeki tarım alanlarında kullanılan bakırlı tarım ilaçları ile fosforlu gübrelerden ve/veya bakır katkılı yem ile beslenen hayvanların dışkılarının ortama bırakılması sonucu olmuş olabilir (Ok, 2008; Duman vd., 2007). Bununla birlikte organik ve inorganik materyaller ile kirlenen Sakarya Nehri'nin tarımsal sulama da kullanımı da yüksek Cu seviyeleri ile sonuçlanabilir ve bu da Cu içeriklerini arttırmış olabilir (Isleyen vd., 2019).

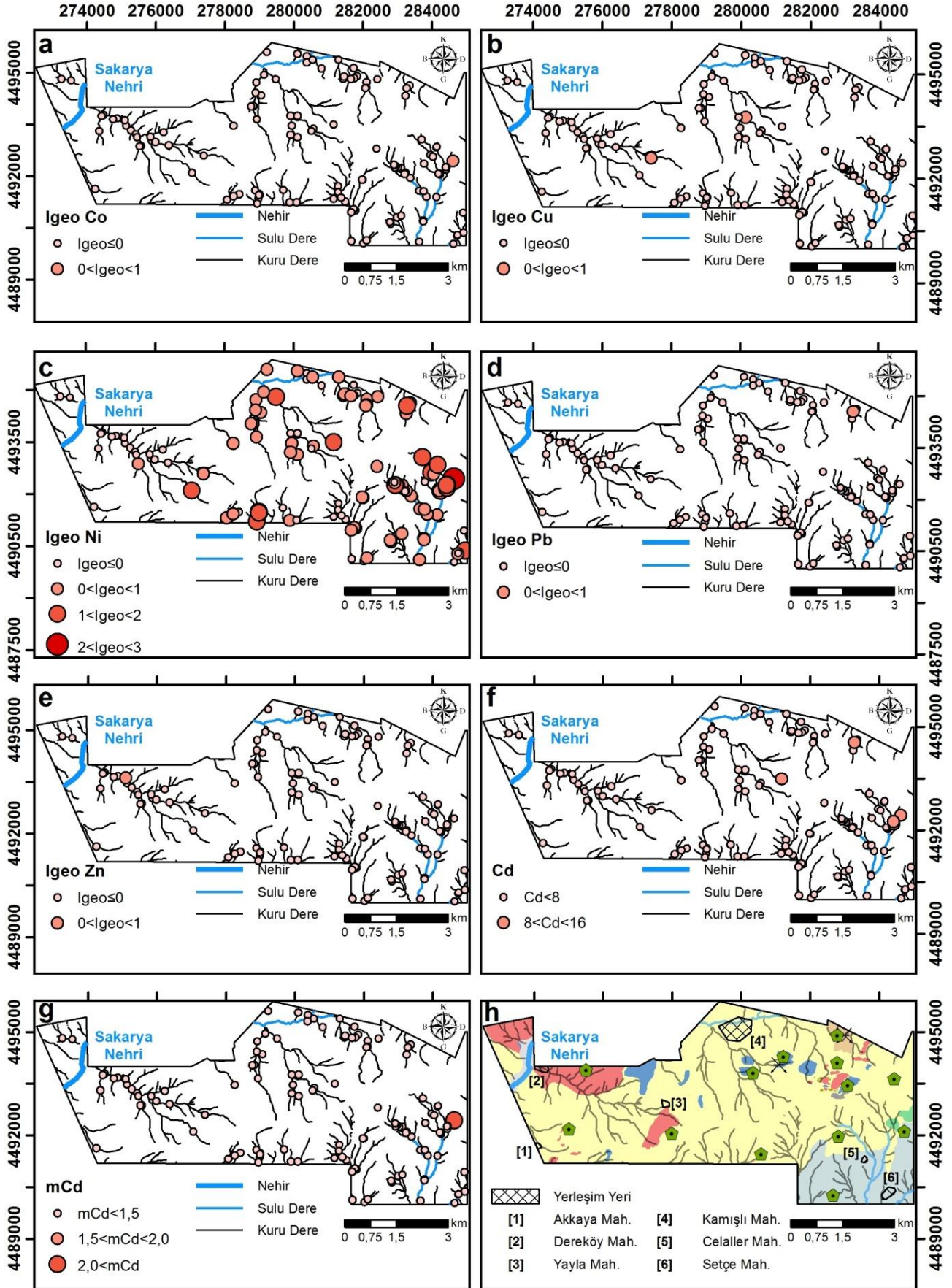
Igeo Ni sonuçlarında kirlenmemiş-orta seviyeden orta-yüksek derecede kirlenmiş seviyeye kadar toplam da 81 örneğin farklı seviyelerde kirlilik gösterdiği belirlenmiştir. Bunların 62 adedi kirlenmemiş-orta, 18 adedi orta (DS-1, 7, 10, 17, 39, 41, 43, 44, 45, 46, 52, 67, 93, 95, 100, 101, 129 ve 133) ve 1 adedi (DS-42) orta-yüksek derecede kirlenmiş seviyeye sahiptir (Şekil 4). Çalışma alanında Igeo Ni açısından farklı seviyelerde kirlenme ile karakteristik olarak gözlenen örneklerin büyük çoğunluğu drenaj sistemlerinin içerisinden geçtiği Abant Formasyonu ve serpantin birimleri ile ilişkili olarak gözlenmektedir (Şekil 5c ve 5h). Bazı dere sedimanı örneklerinin (DS-10, 17, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 52, 93, 95, 100, 101 ve 133) alındığı lokasyonlar antropojenik kökenli bir zenginleşmeye neden olabilecek insan faaliyetlerine uzak olmakla birlikte çoğunlukla ormanlar ile kaplıdır. Dolayısıyla bu türden Ni zenginleşmeleri antropojenik faaliyetlerden ziyade Abant Formasyonu içerisinde haritalanabilir ve/veya haritalanamaz ölçekteki serpantin türü kayaçların günlenerek ayrışması ile ilişkili olmalıdır. Çalışma alanının güneybatı sınırına yakın bir konumdan Ok (2008) ve İşleyen vd. (2019) tarafından alınan toprak örneklerinde tespit edilen, sınır değerleri aşan krom içerikleri Ni zenginleşmelerinin jeojenik kökenli olarak serpantinlerin ayrışması ile ortaya çıkışını destekler niteliktedir. Çünkü bu iki ağır metal jeolojik olarak serpantin türü kayaçların içerisinde oluşum koşulları gereği yüksek değerlerde bulunabilmektedir. Söz konusu örnekler ek olarak çalışma alanında orta ve orta-yüksek derecede kirlilik gösteren örneklerden bazılarının (DS-1, 7, 39, 67 ve 129) bulunduğu lokasyonların en fazla 250 metre uzağında yerleşim yeri, köy yolları ve tarım arazilerinin bulunması, tespit edilen zenginleşmelerin jeojenik kökenli süreçler yanında antropojenik kökenli süreçlerle de ilişkili olduğuna işaret etmektedir. Bölgede tarım araç ve makinelerinde kullanılan dizel yakıtlar ve yağlar (Kalkan & Terzi, 2023; Özkan, 2017) ile fosforlu gübrelerin kullanımı (Ok, 2008) antropojenik kökenli artışı desteklemiş olmalıdır. İşleyen vd. (2019) çalışma alanının güneydoğu sınırına yakın ve Geyve ilçesinin kuzey-kuzeydoğusundan derlediği toprak örneklerindeki yüksek Ni içeriklerinin fabrikalardan kaynaklandığını ifade etse de çalışma alanının konumunun sanayi alanlarına uzaklığı böylesi bir ihtimali sınırlamaktadır.

Igeo Ni açısından orta seviyede kirlenme gösteren 1 adet örnek (DS-17) aynı zamanda Igeo Pb açısından da kirlenmemiş-orta seviyede kirliliğe sahiptir. Bu örnek çalışma alanında Cu-Pb-Zn cevher oluşumlarına ev sahipliği yapan Yanık Tepe'nin güneydoğusundaki Abant Formasyonu ve granitlerin içerisinden geçen dreden alınmıştır (Şekil 5d ve 5h). Lokasyonda antropojenik katkıları sağlayacak bir unsur tespit edilememiştir. Dolayısıyla tespit edilen Pb zenginleşmesi hidrotermal süreçlerle ilişkili olarak ortaya çıkmış Pb'ca zengin altere kayaç kesimleri içeren granitik kayaçların ayrışmasıyla ilgili olabileceği daha geçerli bir olasılık olarak belirginleşmektedir.

Igeo'ya göre hesaplanan Zn sonuçları ise 1 adet örnek (DS-128) için kirlenmemiş-orta seviyede kirliliğin varlığına işaret etmektedir (Şekil 4). Kuşkayası Tepe güneybatısından alınan bu örneğin çevresinde tarım arazilerinin ve tarım araçlarının kullandığı köy yolunun varlığı gerçekleşen Zn zenginleşmesinin antropojenik kökenli olabileceğini önermektedir (Şekil 5e ve 5h). Bununla birlikte literatürde bölge için Zn artışlarının araç emisyonları ile ilişkili olarak ortaya çıktığı da ifade edilmektedir (Isen vd., 2013).

C_d, mC_d, ESPI ve PLI İndeksleri

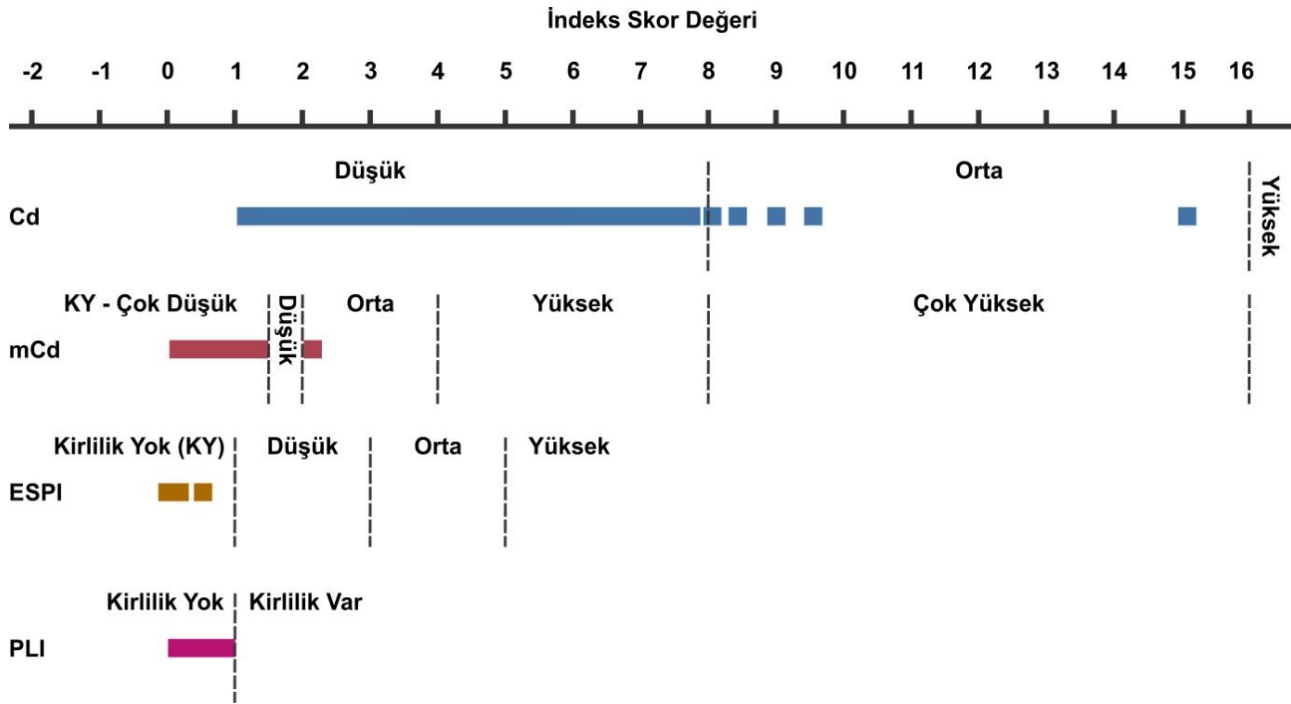
Çalışma alanından derlenen 133 adet dere sedimanı örneğinin ağır metal içerikleri baz alınarak hesaplanan C_d, mC_d, ESPI ve PLI indeks sonuçlarına ait tanımlayıcı istatistiksel bilgiler Tablo 5'de sunulmaktadır. Hesaplama sonuçları C_d'nin 1,2 ile 15,1, mC_d'nin 0,2 ile 2,2, ESPI'nin 0,003 ile 0,5 ve PLI'nın 0,2 ile 0,9 arasında indeks skor değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar ESPI ve PLI indeks sınıfları açısından dere sedimanı örneklerinin kirlenme göstermediklerine işaret etmektedir (Tablo 1; Şekil 6). C_d indeks sonuçları 5 adet örnek (DS-17, 42, 43, 46 ve 133) için orta derecede kirlilik varlığını gösterirken, geri kalan örnekler düşük derecede kirlilik sınıfında yer almaktadır. Bu örneklerden DS-42 aynı zamanda mC_d indeksi için orta derecede kirlenme sergilemekte iken, geri kalan örnekler mC_d için kirlenmemiş-çok düşük kirlilik sınıfında yer almaktadır (Şekil 6). Bu örnekler ayrıca Igeo Ni açısından da orta-yüksek derecede kirlilik göstermektedir. Bununla birlikte DS-17 ve 42 örnekleri sırasıyla Igeo Pb ve Igeo Co açısından da düşük seviyede kirliliğe sahiptir. C_d ve mC_d indekslerine göre kirliliğe sahip örnekler çalışma alanında Avlukaya ve Yanık Tepelerinin güneydoğusunda ve Rüzgârlı Tepe kuzeybatısında yüzeyleyen Abant Formasyonu ve serpantinlerinin yüzeylediği alanlar ile örtüşmektedir. Bu veriler Igeo sonuçlarıyla korele edildiğinde bu örnek lokasyonlarında tespit edilen kirliliğin jeojenik kökenli olarak ortaya çıkışı çok daha belirgin hale gelmektedir (Şekil 5f ve 5g).



Şekil 5. Dere Sedimanı Örneklerine ait İndeks Sonuçlarının Mekânsal Dağılım Haritaları: a. Igeo Co, b. Igeo Cu, c. Igeo Ni, d. Igeo Pb, e. Igeo Zn, f. Cd ve g. mCd, ve h. Çalışma Alanının Jeoloji Haritası (Lejant için Şekil 1'e Bakınız)

Tablo 5. Dere Sedimanı Örneklerinin C_d , mC_d , ESPI ve PLI İndeks Hesaplamalarına ait Tanımlayıcı İstatistikler

	C_d	mC_d	ESPI	PLI
Minimum	1,2	0,2	0,003	0,2
Maksimum	15,1	2,2	0,5	0,9
Ortalama	4,6	0,7	0,047	0,5
Standart Sapma	1,90	0,27	0,05	0,15
Çarpıklık	1,49	1,49	6,12	0,27
Basıklık	6,22	6,18	52,50	0,18
Örnek Sayısı	133			

**Şekil 6.** Dere Sedimanı Örneklerinin C_d , mC_d , ESPI ve PLI Sınıfları

SONUÇLAR

Bu çalışmada Geyve kuzeydoğusundaki çalışma alanındaki drenaj sistemlerinden alınan 133 adet dere sedimanı örneğinin ağır metal (As, Co, Cu, Ni, Pb, V ve Zn) içerikleri belirlenmiş ve zenginleşme/kirlenme anomalisi gösteren alanlar tespit edilmiştir. En yüksek ağır metal içerikleri As için 9 ppm, Co için 51 ppm, Cu için 106 ppm, Ni için 750 ppm, Pb için 37 ppm, V için 61 ppm ve Zn için 170 ppm'dir. Bazı örnekler As açısından üst kıtasal kabuk ve dünya toprak, V açısından üst kıtasal kabuk, diğer ağır metaller açısından üst kıtasal kabuk, şeyl ve dünya toprak ortalama değerlerine göre zenginleşme sergilemiştir.

Igeo indeks hesaplamalarına göre dere sedimanı örnekleri As ve V açısından günümüz için bir kirlilik göstermemiştir. Co, Pb ve Zn açısından 1'er adet örnekte, Cu açısından 2 adet örnekte kirlenmemiş-orta, Ni açısından 62 adet örnekte kirlenmemiş-orta, 18 adet örnekte orta ve 1 adet örnekte orta-yüksek seviyede kirlenmelerin olduğu belirlenmiştir. Tüm ağır metal etkilerini birlikte değerlendirerek hesaplama yapan indekslerden C_d 'ye göre 5 adet örnekte ve mC_d 'ye göre ise 1 adet örnekte orta derecede kirlenme tespit edilmiştir. Değerlendirmeler Co ve Ni zenginleşmelerinin serpantinlerin, Pb zenginleşmelerinin ise granitik kayaların ve cevherli zonların ayrışmasıyla ilişkili olarak jeojenik kökenli olduğunu göstermiştir. Ni açısından bazı örneklerde ise jeojenik etkilerin yanında tarımsal faaliyetler sonucunda ortaya çıkan antropojenik girdilerin varlığı da tespit edilmiştir. Çalışma alanındaki Cu ve Zn zenginleşmelerinin ise ağırlıklı tarımsal faaliyetler ile ilişkili olarak antropojenik kökenli olarak geliştiği ortaya konulmuştur.

Çalışma alanında dere sedimanlarında biriken ağır metaller, drenaj sistemlerini kullanarak Türkiye'nin en önemli nehirlerinden Sakarya Nehri'ne ulaşacaktır. En nihayetinde ağır metallerce zenginleşerek kirlenecek suların tarımsal faaliyetlerde kullanılması kaçınılmaz hale gelecektir. Böylesi bir durum öncelikle besin zinciri döngüsünü tehdit

edecektir. Bu türden riskleri kontrol altına almak ve insan sağlığını korumak için sediman, toprak, yüzey ve yeraltı sularının sistematik ve periyodik olarak izlenmesi, kirletici kaynaklarının belirlenmesi ve kontrol altına alınması zorunludur. Çalışma alanı özelinde jeojenik ve antropojenik kökenli ağır metal zenginleşmelerinin ekolojik risklerinden korunmak için ise dere sedimanı jeokimyası çalışmaları ile tespit edilen anomali alanlarında daha kapsamlı toprak jeokimyası çalışmaları yürütülmelidir. Bu sayede ağır metallere ait zenginleşme/kirlilik alanlarının sınırları çok daha kesin olarak ortaya konulabilecektir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Mehmet Barış Durgun'un diğer iki yazarın danışmanlığında Aksaray Üniversitesi'nde hazırlamış olduğu Yüksek Lisans tezinin bir parçasıdır. Yazarlar, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı ve Doğu Marmara Polimetallik Maden Aramaları projesi (Proje No: 2022-32-13-04-2) kapsamında çalışmalara katılan proje ekibine veri desteği ve katkıları için teşekkür eder ve şükranlarını sunarlar.

KAYNAKLAR

- Abraham, G.M.S., & Parker, R.J. (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>
- Ateş, A., Çalışkan, N., & Demirel, H. (2017). Evaluation of soil quality in Sapanca Lake basin. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 5(1). <https://doi.org/10.21533/pen.v5i1.90>
- Bai, Z., Wu, F., He, Y., & Han, Z. (2023). Pollution and risk assessment of heavy metals in Zuoxiguo antimony mining area, southwest China. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 35(1):2156397. <https://doi.org/10.1080/26395940.2022.2156397>
- Chen, T., Liu, X., Li, X., Zhao, K., Zhang, J., Xu, J., Shi, J., & Dahlgren, R.A. (2009). Heavy metal sources identification and sampling uncertainty analysis in a field-scale vegetable soil of Hangzhou, China. *Environmental Pollution*, 157:1003–1010. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.10.011>
- Çelenk, F., & Kızıloğlu, T. (2015). Distribution of lead accumulation in roadside soils: a case study from D 100 highway in Sakarya, Turkey. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 2(5):1-10.
- Çelik, Ö.F., Gürer, Ö.F., & Öz, İ. (2009). Geyve Boğazı ve Pamukova Arasında Yer Alan Granitoyitik Kayaçların Petrografik ve Jeokimyasal Özellikleri. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi*, 8(1):61-75.
- Demirela, G., Yılmaz, E., & Kavurmacı, M.M. (2020). Hydrogeochemical, geotechnical and soil geochemistry characteristics of Aksaray University campus area, Aksaray. *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 4(1):90-112. <https://doi.org/10.29002/asujse.712844>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9580-3>
- Durgun, M.B. (2024). Geyve (Sakarya) civarında ağır metal zenginleşmeleri: toprak ve dere sedimanı jeokimyası çalışmaları. Yüksek Lisans Tezi. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Durgun, M.B., Demirela, G., & Terzi, M.H. (2024a). Heavy metal contamination in soils: Kamışlı (Geyve/Sakarya), NW Türkiye. In AGRO International Conference on Agriculture-II, June 05-07, 2024, Azerbaijan State Agricultural University, Ganja (Azerbaijan), Proceedings Book, p. 312-313.
- Durgun, M.B., Demirela, G., & Terzi, M.H. (2024b). The Origin of heavy metal enrichments in soils; Celaller region (Geyve/Sakarya), NW Türkiye. In 4th International Graduate Studies Congress (IGSCONG'24), June 5-8, 2024, Proceedings Book, p. 1006-1007.
- Durgun, M.B., Terzi, M.H., & Demirela, G., (2024c). Geyve (Sakarya, Türkiye) dere sedimanlarındaki ağır metal zenginleşmelerinin kökeni. 10. Jeokimya Sempozyumu, 17-19 Ekim 2024, Antalya (Türkiye), Bildiri Özleri Kitabı, s. 90-91.
- Dundar, M.S., Altundag, H., Eyupoglu, V., Keskin, S.C., & Tutunoglu, C. (2012). Determination of heavy metals in lower Sakarya river sediments using a BCR-sequential extraction procedure. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184:33-41. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1944-7>

- Erturaç, M.K. (2018). Sakarya'nın jeolojik özellikleri. C. İkiel (Ed.), Sakarya'nın Fiziki, Beşeri ve İktisadi Coğrafya Özellikleri, Sakarya Üniversitesi Yayınları, s. 96-116.
- Esmaili, A., Moore, F., Keshavarzi, B., Jaafarzadeh, N., & Kermani, M. (2014). A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran. *Catena*, 121:88-98. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.003>
- Geyve Belediyesi, 2024. <https://www.geyve.bel.tr/icerik/geyve-tarihi>, Erişim Tarihi: 07.10.2024.
- Gopal, V., Krishnamurthy, R.R., Indhumathi, A., Sharon, B.T.X., Priya, T.S.D., Rathinavel, K., Bharath, K.M., Magesh, N.S., & Ayyamperumal, R. (2024). Geochemical evaluation, ecological and human health risk assessment of potentially toxic elements in urban soil, southern India. *Environmental Research*, 248:118413. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118413>
- Göllü, E. (2019). Aşağı Sakarya havzası jeotermal alanının hidrojeoloji ve hidrojeokimyasal incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*, 14(8):975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Isen, H., Altundag, H., & Keskin, C.S. (2013). Determination of heavy metal contamination in roadside surface soil by sequential extraction. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(5):1381-1385.
- Isleyen, M., Akpınar, A., Eren, B., & Ok, G. (2019). Heavy metal profiles of agricultural soils in Sakarya, Turkey. *Environmental Engineering Research*, 24(3):427-433. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.274>
- Kalkan, M., & Terzi, M.H. (2023). Assessment of heavy metal pollution of the soils in the southwest of Aksaray city. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 4(2):219-231. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.1360204>
- Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun tektonik birlikleri (Tectonic units of Anatolia). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 66:20-37.
- Kızıloğlu Algan, F.T., & Bilen, S. (2005). Toprak kirlenmesi ve biyolojik çevre. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(1): 83-88.
- Koljonen, T. (1992). Geochemical Atlas of Finland, Part 2: Till. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland, 218 pp.
- Muller, G. (1969). Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2(3):108-118.
- Ochiagha, K.E., Okoye, P.A.C., & Eboagu, N.C. (2020). The geo-accumulation index of some heavy metals in the roadsides soils of Onitsha south local government area Anambra state, Nigeria. *Science Journal of Chemistry*, 8(3):42-47. <https://doi.org/10.11648/j.sjc.20200803.11>
- Ok, G. (2008). Sakarya bölgesindeki topraklardaki inorganik kirleticilerin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Okay, A.I., Bozkurt, E., Satır, M., Yiğitbaş, E., Crowley, Q.G., & Shang, C.K. (2008). Defining the southern margin of Avalonia in the Pontides: geochronological data from the Late Proterozoic and Ordovician granitoids from NW Turkey. *Tectonophysics*, 461(1-4):252-264. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.02.004>
- Özer, C., Çevikbaş, A., & Eyüpoğlu, M. (2013). Çamyurdu (Mudurnu-Bolu), Örencik, Kirpiyen (Geyve-Sakarya) ruhsat sahaları maden jeolojisi ve prospeksiyon çalışmaları. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 16:205-214.
- Özer, C., Turan-Altunsoy, A., Durgun, M. B., Yalçın, Ç., Baran, G., & Kaplan, H. (2021). Celaller (Geyve-Sakarya) sahası jeoloji haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Özkan, A. (2017). Antakya-Cilvegözü karayolu etrafındaki tarım arazilerinde ve bitkilerdeki ağır metal kirliliği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3):9-18. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.357176>
- Özkul, C., Acar, R.U., Köprübaşı, N., Er, A.E., Kızılkaya, H.İ., Metin, M., & Şenel, M.N. (2018). Altıntaş (Kütahya-Türkiye) ovası tarım topraklarında ağır metal kirliliğinin araştırılması, öncel çalışma. *Journal of Applied Earthsciences*, 17(1):13-26. <https://doi.org/10.30706/uybd.426408>

- Parlak, M., Çıkılı, Y., & Çiçek, G. (2020). Kereviz tarlalarının verimlilik durumları ile ağır metal kapsamının toprak ve yaprak analizleriyle belirlenmesi: Sakarya-Geyve Örneği. *COMU Journal of Agriculture Faculty*, 8(1):173-185. <https://doi.org/10.33202/comuagri.686369>
- Ravankhah, N., Mirzaei, R., & Masoum, S. (2017). Determination of heavy metals in surface soils around the brick kilns in an arid region, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 176:91-99. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.01.005>
- Reimann, C., & De Caritat, P. (1998). Chemical elements in the environment: factsheets for the geochemist and environmental scientist. 1st edition, Springer-Verlag Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-72016-1>
- Sakarya İl Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2015. <https://sakarya.tarimorman.gov.tr/Menu/27/Geyve-Ilce-Mudurlugu>, Erişim Tarihi: 07.10.2024.
- Sisman, I., Imamoglu, M., & Aydin, A.O. (2002). Determination of heavy metals in roadside soil from Sapanca area highway, Turkey. *International Journal of Environment and Pollution*, 17(4):306-311. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2002.000674>
- Stoffers, P., Glasby, G.P., Wilson, C.J., Davis, K.R., & Walter, P. (1986). Heavy metal pollution in Wellington Harbour. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 20(3):495-512. <https://doi.org/10.1080/00288330.1986.9516169>
- Şener, Ş., & Şener, E. (2015). Kovada Gölü (Isparta) dip sedimanlarında ağır metal dağılımı ve kirliliğinin değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(2):86-96.
- Temur, E., & Aksay, A. (2002). 1:100.000 ölçekli Türkiye jeoloji haritaları, Adapazarı G24 paftası, MTA Yayınları, 31.
- Terzi, M.H., & Kalkan, M. (2024). Evaluation of soil pollution by heavy metal using index calculations and multivariate statistical analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(5):443. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12569-3>
- Tomlinson, D.C., Wilson, J.G., Harris, C.R., & Jeffery, D.W. (1980). Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 33:566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>
- Wedepohl, K.H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 59(7):1217-1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Yılmaz, E., & Terzi, M.H. (2023). Geochemical investigation of soil quality in terms of toxic elements using an AHP-based index. *Environmental Geochemistry and Health*, 45:8271-8294. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01720-7>