



Hidrotermal Akışkanlarca Etkilenen Toprakların Ağır Metal İçeriği ve Jeokimyasal Ayırışma Düzeyleri (Sarayköy-Denizli Örneği)

Özcan SOLUK¹

Hasan ÖZCAN^{2*}

¹ ÇOMÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, 17020, Çanakkale

² ÇOMÜ, Ziraat Fakültesi, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, 17020, Çanakkale

*Sorumlu Yazar: hozcan@comu.edu.tr

Özet

Jeotermal akışkanların kimyasal bileşimleri ve asidite değerlerindeki farklılaşmalar etkileşim halinde buldukları topraklarda kimyasal reaksiyonlarda değişime neden olarak birikimlere ve/veya yıkanmalara neden olabilmektedirler. Bu çalışmada, Büyük Menderes grabeninde yer alan Denizli ili Buharkent-Sarayköy bölgesinde buhar çıkışı şeklinde görülen hidrotermal akışkanlarca etkilenen topraklarda, toprak profilindeki ağır metal içeriği ve jeokimyasal ayırışma düzeyleri incelenmiştir. Büyük Menderes Grabeninde 7 farklı noktada 0-30cm, 30-60cm, 60-90cm ve 90-120 cm derinliklerinde alınan toprak örneklerinde ağır metal (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn) analizleri ICP-OES, oksit analizleri ise XRF cihazında belirlenmiştir. Oksit analiz sonuçlarında jeokimyasal ayırışma düzeylerinin değerlendirilmesinde 8 farklı ayırışma indeksi uygulanmıştır. Tüm örnekleme noktalarındaki ortalama ağır metal analiz sonuçları değerlendirildiğinde Ni>Cr>Zn>Pb>Co>Cu>Cd sıralaması belirlenmiştir. Ortalamalara göre en düşük ağır metal konsantrasyonu T1, en yüksek konsantrasyon ise T5 ve K2 noktasında bulunmuştur. Uygulanan ayırışma indekslerinden CIA, CIW, PIA ve V indeksine göre ayırışma sıralaması T3>T4>T5>K2>K1>T1-T2 şeklinde olup, en yüksek ayırışma T3-T4 noktalarındadır.

Anahtar Kelimeler: Hidrotermal akışkanlar, Ağır metaller, Kimyasal ayırışma indisleri, Sarayköy

Heavy Metal Content and Geochemical Weathering Levels of Soils Affected by Hydrothermal Fluids (A case study: Sarayköy-Denizli)

Abstract

The chemical composition of the geothermal fluids and the differences in acidity values may cause changes in chemical reactions in the soil they interact with, causing accumulation and / or washing. In this study, the heavy metal content and geochemical weathering levels of soil profile were investigated in the soils affected by hydrothermal fluids, which are seen as steam outflow in Denizli, Buharkent-Sarayköy region located in Büyük Menderes graben.

Heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) were analyzed in soil samples taken at 0-30cm, 30-60cm, 60-90cm and 90-120 cm depths at 7 different points in Büyük Menderes Graben by using ICP-OES and oxide analysis was determined on the XRF device. 8 different weathering indexes were used to evaluate the geochemical weathering levels. The average heavy metal analysis results at all sampling points were evaluated and, Ni> Cr> Zn> Pb> Co> Cu> Cd ranking was determined. According to the averages, the lowest heavy metal concentration was found at T1 and the highest concentration at T5 and K2. The decomposition order according to CIA, CIW, PIA and V index among the applied weathering indexes is T3> T4> T5> K2> K1> T1-T2 and the highest decomposition is at T3-T4 points.

Keywords: Hydrothermal fluids, Heavy metals, Chemical weathering index, Sarayköy

Giriş

Jeotermal enerji; sıcaklıkları sürekli olarak bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilen sıcak su ve buhar olarak tanımlanabilir (Ertürk ve ark, 2006). Büyük Menderes grabeni ve grabeni çevreleyen horstlar fazla miktarda değişik boyutlarda fay içermektedirler. Büyük menderes grabeninde yer alan Denizli ili Buharkent-Sarayköy bölgesi jeotermal enerjinin buhar olarak çıktığı alanlardan biridir. Bölgede oluşan jeotermal akışkanlar 2000’li yılların başına kadar buhar olarak yüzeye çıkmaktaydı. Bölgede jeotermal elektrik üretimi için yapılan sondajlardan sonra buhar çıkışları azalmıştır.

Jeotermal suların bulunduğu ortamlarda su-kayaç ilişkisi ve oluşacak reaksiyon hızı sıcaklığın bir fonksiyonudur (Aslan, 2010). Sıcak sular kimyasal alterasyonu (dönüşümü) artırmaktadır. Jeotermal alanlarda alterasyon, suların özellikleri ve etkileri ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır (Haklıdır ve ark, 2015; Markusson ve Stefansson, 2011; Boothroyd, 2009; Barut ve ark, 2013; Poyraz, 2016). Akışkanın bileşimi ve pH değerleri özellikle etkileşim halinde oldukları kayaç ve kayaçlar üzerinde oluşmuş veya bulunan topraklarda kimyasal reaksiyonların türü ve hızı üzerine etki etmeleri kaçınılmazdır. Ayrışma hassasiyeti yüksek olan, diğer bir deyişle direnci düşük olan kayaçlar yumuşak, çok gözenekli, heterojen veya kırıntılıdır. Kimyasal ayrışma ve alterasyon mineral direnci yanında çevresel faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. İklimsel değişkenlikler, topoğrafik koşullar, tabansuyu varlığı, bitki örtüsü ve diğer canlılar, hidrotermal koşullar ayrışma ve alterasyon koşulları üzerinde önemli etkilere sahiptirler. Özellikle mobiliteleri veya yararılılıkları toprak reaksiyonuna göre değişen ağır metallerin akışkanın pH ve bileşimine göre farklılaşması, topraklarda ağır metal hareketine, ağır metal kirliliğine ve yıkanmalarla yer altı su kalitesinde değişimlere neden olabilirler. Ayrışma sonucu ortaya çıkan elementlerin yeniden dağılımında söz konusu elementlerin mobiliteleri ve yıkanma sonundaki jeokimyasal değişimler ana belirleyici faktörlerdir. Toprak ve kayaçlardaki ayrışmanın değerlendirilmesinde akışkan sulu ortamın jeokimyasal özellikleri ve ayrışmış profilin jeokimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi gerekir (Aiuppa ve ark, 2000). Ayrıca ayrışmanın sayısal ifadesinde ise ayrışma indisleri kullanılmaktadır.

Toprak sistemi içerisinde katılım, kayıp, yer değişim ve dönüşüm gibi süre giden pedojenik süreçlerle meydana gelen değişimlerin sayısallaştırılmasında kimyasal alterasyon indeksi (CIA) (Nesbitt ve Young 1984), kimyasal ayrışma indeksi (CIW) (Harnois, 1988), plajiyoklas alterasyon indeksi (PIA) (Fedo ve ark, 1995), baz/ seskioksit indeksi (Birkeland 1999), ürün indeksi (Product indice, PWI) (Reiche, 1950), Ruxten oranı (Ruxten, 1968, R), Vogt indeksi (Vogt, 1927, V) ve Parker ayrışma indeksi (WIP) (Parker, 1970) gibi indeksler kullanılmaktadır. Kimyasal ayrışma indisleri farklı kayaç ve topraklarda uygulanmıştır (Barnes, 1979; Baulun ve ark, 2000; Wagner ve ark, 2007; Price ve Velbel, 2003; Fiantis ve ark, 2010; Liu ve ark, 2012).

Bu çalışmada, Denizli ili Buharkent-Sarayköy bölgesinde Büyük Menderes grabeninde etek düzü, taşkın düzlüğü ve teraslarında hidrotermal akışkanlarca etkilenen toprakların ağır metal içerikleri ve ayrışma düzeylerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

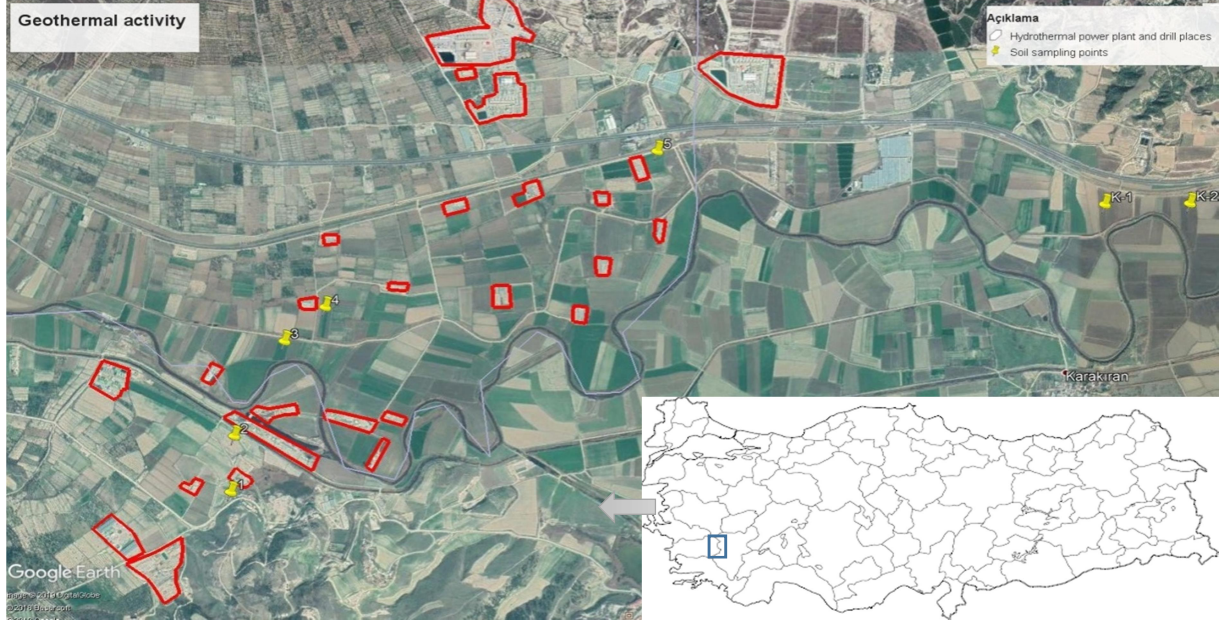
Materyal ve Yöntem

Materyal

Çalışma; Denizli-Aydın il sınırları arasında yer alan Sarayönü-Buharkent ilçe sınırları içerisinde Büyük Menderes grabeninde yürütülmüştür (Şekil 1). Batı Anadolu tektonik yapısı içerisinde değerlendirilen sahada horst-graben sistemi çok evreli ve yoğun tektonik hareketlerle oluşmuştur. Büyük Menderes Grabeni ve kenarlarında yer alan horstları oluşturan faylarla taşınan jeotermal akışkanlar pliosen yaşlı gölssel çökellerdeki kireçtaşları ve paleozoik mermer-şist-kuvarsit gibi uygun rezervuarlarda birikmişlerdir. Havzanın değişik kesimlerinden alınmış jeolojik kesitlerden Menderes Neojen birimleri; alüvyal yelpaze, yelpaze deltası, yamaç molozu, göl ve akarsu ortamlarında depolanan ve graben dolguları olarak nitelendirilebilecek çökellerden oluşmuştur (Şimşek, 1984). Kuvaterner birimleri, alüvyal çökellerle temsil edilen orta-kalın ve az belirgin tabakalanma gösteren gevşek tutturulmuş çakıltaşı-kumtaşı-silttaşı-çamurtaşı düzensiz ardalanması başlıca kaya topluluğunu oluşturur. Bölgedeki sıcak sular genellikle fay hatları ve grabenleri oluşturan

Hidrotermal Akışkanlarca Etkilenen Toprakların Ağır Metal İçeriği ve Jeokimyasal Ayrışma Düzeyleri (Sarayköy-Denizli Örneği)

faylar üzerinde yer almaktadır. Menderes Masifi metamorfite (mermer, kalker, kuvarz, çeşitli şistler ve gnaylar) içindeki mermer kalker ve kuvarz zonları kırık-çatlaklı, geçirimsiz özellikte olup en önemli sıcak su akiferini oluşturmaktadır. Alanda 100 °C civarında çok sıcak su kaynağı ve doğal buhar çıkışları bulunmaktadır. Grabende farklı fiyografyalardan alınan topraklar çalışmanın materyalini oluşturmaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı ve örnekleme noktaları (Kırmızı çizgiler: jeotermal sondaj alanları ve elektrik üretim tesisleri, sarı simgeler ise örnekleme noktaları)

Yöntem

Çalışma alanında jeotermal sondaj alanları dikkate alınarak doğu-batı doğrultusunda transekt belirlenmiştir. T1, T2, T3, T4 ve T5 örnekleme noktaları sondaj tesislerinin yakınında, K1 ve K2 örnekleme noktaları ise tesislerden uzak noktada yer almaktadır (Şekil 2, 3). Transekte 3 farklı fizyografya; dağ eteği (T1), genç taşkın düzlüğü (T3, T4, K1), fluvial teras (T2-en yaşlı, T5, K2) yer almaktadır. Tabansuyu duruma bağlı olarak 0-3cm, 30-60cm, 60-90cm ve 90-120cm derinliklerden auger burğu ile toprak örnekleri alınmış (6-9 nisan, 2019), GPS ile örnekleme noktalarının koordinatları belirlenmiştir. Toprak örnekleri plastik kaplar içinde hava kuru hale getirilmiştir. Hava kuru hale gelen topraklar tahta tokmak yardımıyla öğütülmüş ve 2 mm'lik elekten geçirilerek elenmiştir. Örneklerin bir kısmı seramik havan kullanılarak homojenize edilerek 0.5 mm elekten elenmiş ve ağır metal, kireç ve organik madde analizlerinde bu örnekler kullanılmıştır.



Şekil 2. 5 nolu örnekleme noktası yanı



Şekil 3. (T1 örnekleme noktası)

Hidrotermal Akışkanlarca Etkilenen Toprakların Ağır Metal İçeriği ve Jeokimyasal Ayrışma Düzeyleri (Sarayköy-Denizli Örneği)

Alınan toprak örneklerinin rutin analizleri ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü laboratuvarında, ağır metal analizleri hizmet alımı kapsamında ÇOMÜ merkez laboratuvarında, 20 örnekte oksit analizi MTA Genel Müdürlüğü laboratuvarlarında yaptırılmıştır.

Analizler

Tekstür Tayini: Bozulmuş toprak örneklerinde 2 paralelli olarak Bouyoucos(1951) Hidrometre yöntemi ile tekstür tayini yapılmıştır (Gee and Bauder. 1986).

Organik Karbon: Modifiye edilmiş Lichterfelder yaş yakma (Schlichting ve Blume, 1966) yöntemine göre yapılmıştır.

pH: 1:2.5 toprak-su karışımında pH-metre ile potansiyometrik olarak ölçülmüştür (Grewelling Ve Peech 1960).

Kireç: Scheibler kalsimetresi ile belirlenmiştir (Schlichting ve Blume, 1966).

Total Tuz (EC): 1:2.5 toprak-su karışımında (Richards, 1954). EC metre ile ölçüm alınmıştır.

Toprak Örneklerinin Ağır Metal Durumu

Toprak örneklerinde toplam ağır metal konsantrasyonlarının belirlenmesi için kral suyu ile yaş yakma prosedürü uygulanmıştır. Kral suyu (1:3 HNO₃:HCl oranı) ile yakılan örneklerden elde edilen ekstraktlar ICP-OES cihazı kullanılarak Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Merkez Laboratuvarında hizmet alımı ile belirlenmiştir. 1g toprak örneği mikrodalgaya aktarılmış ve üzerine 4 mL HNO₃ ile 12 mL HCl eklenmiştir. Daha sonra örnekler mikrodalgadan alınarak filtre kağıdı konulmuş huni yardımı ile 50 mL lik balon jöjeye süzölmüş ve çözelti son hacmine saf su ile tamamlanmıştır (50 mL).

Toplam ağır metal içeriği için doğruluk testi (validasyon)

Toplam ağır metal için **GBW-07424** (toprak) kullanılmıştır. Toprak örneklerine uygulanan tüm işlemler aynı şekilde GBW-0724 sertifikalı referans maddelerine de uygulanmış ve bulunan değerler ile sertifikada yer alan değerler karşılaştırılmıştır.

Oksit Analizleri: Toprak örneklerinin oksit içerikleri XRF cihazı ile belirlenmiştir. Bunun için toprak örnekleri havanda öğütölmerek toz haline getirilmiş ve analizler MTA'da hizmet alımı ile yaptırılmıştır.

Oksit analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde aşağıdaki ayrışma indisleri kullanılmıştır.

A. Kimyasal Alterasyon İndeksi (CIA) (Nesbitt and Young, 1982)

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$$

B. Kimyasal Ayrışma İndeksi (CIW) (Harnois, 1988)

$$CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \times 100$$

C. Bazlar/R₂O₃ Oranı (Birkeland, 1999)

$$Bazlar/R_2O_3 = (MgO + CaO + Na_2O + K_2O) / (TiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3)$$

D. Parker Ayrışma İndeksi (WIP) (Parker, 1970)

$$WIP = (100) [(2Na_2O/0.35) + (MgO/0.9) + (2K_2O/0.25) + (CaO/0.7)]$$

E. Plajoklas Alterasyon İndeksi (PIA) (Fedö ve dg., 1995)

$$PIA = (100) [(Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$$

F. Product İndeksi (P) (Reiche, 1950)

$$PWI = (100) [(SiO_2 / (TiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3 + SiO_2)]$$

G. Vogt İndeksi (V) (Vogt, 1927)

Hidrotermal Akışkanlarca Etkilenen Toprakların Ağır Metal İçeriği ve Jeokimyasal Ayrışma Düzeyleri (Sarayköy-Denizli Örneği)

$$V = (Al_2O_3 + K_2O) / (MgO + CaO + Na_2O)$$

H. Ruxten Oranı (R) (Ruxten, 1968)

$$R = SiO_2 / Al_2O_3$$

Bulgular Ve Tartışma

Menderes grabeninde doğu-batı doğrultusunda üç farklı fizyografyada 7 noktada profil derinliğinde tabansuyu durumuna bağlı olarak 3-4 farklı derinlikten alınan toprak örnekleri ve bunlara ait rutin analiz sonuçları Çizelge 1'de, ağır metal analiz sonuçları Çizelge 2, oksit analiz sonuçlarında uygulanan kimyasal ayrışma indeks değerleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışma alanı topraklarına ait bazı fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

Profil No	Derinlik (cm)	pH	EC (mS/cm)	Organik madde (%)	CaCO ₃ (%)	Toprak Bünyesi			
						% Kil	% Silt	% Kum	Sınıf
T1	0-30	8.05	4.09	1.05	10.41	27.7	35.4	36.9	CL
	30-60	8.77	1.34	0.92	2.52	38.1	16.7	45.2	CL
	60-100	8.93	0.93	0.60	7.18	31.9	29.2	39.0	CL
T2	0-30	8.20	0.81	0.99	9.38	48.5	33.3	18.1	C
	30-60	8.32	0.75	0.40	9.14	47.6	29.2	23.8	C
	60-100	8.95	0.75	0.38	8.97	23.5	27.6	48.9	SCL
T3	0-30	8.01	0.26	1.04	10.29	31.9	33.3	34.8	CL
	30-60	8.73	0.21	0.45	10.33	19.4	46.2	33.4	L
	60-90	8.51	0.35	0.25	5.91	13.1	41.7	45.2	L
	90-120	8.20	0.51	0.22	10.02	23.5	37.5	39.0	L
T4	0-30	8.15	0.83	0.83	7.93	23.5	33.3	43.1	L
	30-60	7.78	1.40	0.36	10.41	25.6	35.4	39.0	L
	60-90	7.93	1.08	0.47	8.60	36.0	35.4	28.5	CL
	90-120	8.07	0.75	0.25	8.12	19.4	29.2	51.5	L
T5	0-30	8.08	0.26	0.62	10.25	31.9	39.6	28.5	CL
	30-60	8.38	0.21	0.45	10.73	29.8	40.2	30.0	CL
	60-90	8.28	0.30	0.37	10.41	29.6	45.8	24.6	CL
	90-120	8.24	0.32	0.28	9.07	30.6	35.4	34.0	CL
K1	0-30	8.51	0.22	0.66	8.60	17.3	25.0	57.7	SL
	30-60	8.30	0.27	0.41	8.52	11.0	27.1	61.9	SL
	60-90	8.28	0.26	0.28	1.50	4.8	12.5	82.7	LS
	90-120	8.18	0.30	0.51	2.29	9.0	31.3	59.8	SL
K2	0-30	8.19	0.27	0.91	8.68	23.5	43.8	32.7	L
	30-60	8.31	0.29	0.65	7.49	23.8	27.1	49.1	L
	60-90	8.15	1.72	0.13	8.28	27.7	42.6	28.5	CL
	90-120	7.88	1.52	0.23	7.10	21.5	37.5	41.0	L

Hidrotermal Akışkanlarca Etkilenen Toprakların Ağır Metal İçeriği ve Jeokimyasal Ayrışma Düzeyleri (Sarayköy-Denizli Örneği)

Çizelge 2. Çalışma alanı toprakları ağır metal içerikleri (µg/g)

Profil No	Derinlik (cm)	Cd (µg/g)	Cr (µg/g)	Cu (µg/g)	Ni (µg/g)	Pb (µg/g)	Zn (µg/g)	Co (µg/g)
T1	0-30	0.54	92.43	15.47	147.60	29.61	44.71	18.82
	30-60	0.35	40.88	8.27	68.80	23.42	23.93	9.86
	60-90	0.75	49.73	10.11	117.08	56.08	42.43	15.68
T2	60-100	0.54	105.11	16.63	175.89	32.52	49.32	18.58
	0-30	0.53	104.72	15.14	175.76	29.07	42.85	19.92
	30-60	0.76	106.54	20.47	172.59	66.20	46.09	22.10
T3	60-100	0.41	82.42	16.49	135.15	44.20	43.13	14.55
	0-30	0.30	101.79	20.48	234.15	22.12	54.60	22.04
	30-60	0.20	75.92	14.97	158.02	16.19	45.04	15.08
	60-90	0.32	92.76	19.75	197.04	19.77	67.25	18.93
T4	90-120	0.52	90.22	18.27	194.79	76.85	52.10	18.80
	0-30	0.29	91.33	17.53	192.69	20.72	46.78	18.53
	30-60	0.36	124.74	22.18	248.49	23.61	54.80	22.34
	60-90	0.16	67.34	13.99	121.50	14.12	38.91	12.31
T5	90-120	0.44	114.86	20.98	271.59	74.50	58.15	24.06
	0-30	0.30	107.12	19.45	247.38	24.62	48.18	21.31
	30-60	0.28	99.91	19.33	239.73	19.39	49.00	21.09
	60-90	0.31	118.37	20.90	267.75	21.05	51.90	21.91
K1	90-120	0.45	113.10	21.13	203.43	26.20	61.80	22.06
	0-30	0.25	117.72	18.48	183.54	32.29	49.28	19.08
	30-60	0.34	102.31	13.62	159.21	46.31	39.85	14.76
	60-90	0.32	88.99	13.69	149.88	36.09	36.28	15.91
K2	90-120	0.42	98.35	21.97	188.88	28.71	70.35	22.08
	0-30	0.30	97.96	20.74	164.25	23.03	55.10	19.61
	30-60	0.33	134.75	24.85	257.76	27.31	66.55	25.20
	60-90	0.34	139.04	22.92	278.04	28.96	57.50	26.03

Hidrotermal Akışkanlarca Etkilenen Toprakların Ağır Metal İçeriği ve Jeokimyasal Ayrışma Düzeyleri (Sarayköy-Denizli Örneği)

Çizelge 3. Çalışma alanı topraklarına ait oksit analiz sonuçlarına uygulanan kimyasal ayrışma indeks sonuçları

Örnek No	KİMYASAL AYRIŞMA İNDEKSLERİ							
	CIA	CIW	Bazlar/R ₂ O ₃	WIP	PIA	PWI	V	R
T1 (0-30cm)	21,81	23,01	2,80	4423,12	16,63	82,06	0,28	7,65
T1 (30-60cm)	13,24	13,68	5,64	4425,08	9,98	89,66	0,15	13,08
T1 (60-100cm)	18,81	19,68	4,37	4574,13	14,43	87,88	0,19	11,12
T2 (0-30cm)	19,52	20,23	3,39	4118,10	15,97	72,22	0,24	3,98
T2 (30-60cm)	16,22	16,72	4,32	5233,97	13,26	73,23	0,18	4,18
T2 (60-100cm)	16,20	16,75	4,47	5507,62	12,89	77,02	0,18	5,06
T3 (0-30cm)	39,42	42,60	1,32	5353,97	31,93	72,09	0,69	3,75
T3 (30-60cm)	43,79	48,05	1,19	4779,68	34,93	71,39	0,83	3,49
T3 (60-100cm)	42,64	46,89	1,24	5232,54	33,56	74,04	0,83	3,86
T4 (0-30cm)	42,78	47,08	1,22	5618,41	33,64	74,45	0,82	4,03
T4 (30-60cm)	41,77	45,83	1,27	5212,70	32,92	73,35	0,78	3,81
T4 (60-100cm)	40,97	44,58	1,30	5242,06	32,87	67,52	0,74	2,92
T5 (0-30cm)	36,26	38,91	1,57	5619,68	29,46	65,83	0,60	2,66
T5 (30-60cm)	37,50	40,49	1,51	5964,44	30,12	67,87	0,63	2,95
T5 (60-100cm)	42,14	45,86	1,28	5779,84	34,04	68,79	0,76	3,03
K1 (0-30cm)	31,55	33,33	1,72	5519,84	26,20	77,09	0,48	5,06
K1 (30-60cm)	30,13	31,68	1,82	4734,13	25,24	80,33	0,45	6,15
K1 (60-100cm)	18,87	19,36	3,00	4562,22	16,31	79,84	0,25	6,28
K2 (0-30cm)	31,02	32,80	1,77	5981,43	25,59	75,61	0,48	4,56
K2 (30-60cm)	28,83	30,40	1,91	4904,60	23,67	76,35	0,44	4,83

Çizelge 1 incelendiğinde toprakların pH değerleri 7.78-8.95 arasında hafif-orta alkali özellikte olduğu görülmektedir. Bunun başlıca nedeni toprakların jeotermal akışkanlar etkilenmesidir. Benzer sonuçlar Everest ve Özcan (2019) tarafından da rapor edilmiştir. Barut ve ark, (2013) Kızılder jeotermal alanındaki sıcak su ve buhar çıkışlarından yoğunlaşan suda karbondioksit, sodyumkarbonat, bor, silis, fluor ve amonyum bulunduğunu ve suları sülfat ve karbonatlı sular sınıfında sınıflamışlardır. Şamilgil (1992) Denizli ili ve çevresindeki sıcak sularda Na/Ca oranının Kızılder'de daha yüksek olduğunu belirtmektedir.

Elektriksel iletkenlik değerleri T1 noktası 0-30cm derinlik (>4mmhos/cm) hariç diğer tüm örneklerde <2mmhos/cm dir.T1 noktası yüzey örneğindeki yükseklik, örnekleme noktasını çevreleyen deredeki jeotermal atık sularının (Şekil 3) yoğunlaşarak yüzeye çökmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çalışma alanında çok uzun yıllar buhar çıkışı, tarımsal faaliyetlerin yok denecek kadar az olması ve beraberinde ortamda oluşan mikroklimatik yüksek sıcaklık topraklarda yeterince organik madde birikmesini engellemiştir. Bu nedenle çalışma alanı topraklarının organik madde içerikleri yoğunluklu olarak <%1 dir.

Jeotermal akışkanların uzun yıllar buhar olarak çıktığı alanda yoğunlaşarak çökmeden dolayı üst topraklardaki kireç içerikleri alt katmanlara göre daha yüksektir. Bu durum bölgedeki jeotermal suların fiziko-kimyasal özellikleri ile uyumludur.

Hidrotermal Akışkanlarca Etkilenen Toprakların Ağır Metal İçeriği ve Jeokimyasal Ayrışma Düzeyleri (Sarayköy-Denizli Örneği)

T2 (yaşlı teras) alanda en ağır bünyeli olup bunu T1 (etek düzü) örnekleme noktasındaki (orta ağır-ağır bünyeli) topraklar izlemektedir. Toprak bünyesi en hafif K1, en ağır olanı ise T2 noktasındaki topraklarda belirlenmiştir.

Çizelge 2 incelendiğinde toprakların ağır metal içerikleri örnekleme noktaları arasında ve profil boyunca farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Topraklardaki kimyasal ayrışmanın (özellikle hidroliz reaksiyonu) ilk safhalarında minerallerdeki çok hareketli (Na, K, Ca ve Mg gibi) elementler ayrılarak toprak çözeltilerine geçerler. Ayrışmanın ilerleyen safhaları ve kil oluşumu aşamalarında Mn, Ni, Cu, Co, Fe ve ileri ayrışmada Si toprak çözeltilisine geçerek profilden yikanabilir. Çalışma alanındaki farklı fizyografyalarda yer alan ve heterojen özellikli topraklarda ağır metal konsantrasyonları çok değişkenlik göstermektedir. Anamateryal farklılaşması, topoğrafik özellikler (eğim), son 20 yılda yapılan tarımsal faaliyetler ve kullanılan girdilerdeki farklılıklar, ana yola yakınlık ve örtü türlerindeki değişimler ile topraklardaki jeotermal etkileşimler ağır metal konsantrasyonlarındaki değişimi nedenleri olduğu düşünülmektedir.

Çok çeşitli kaynaklara göre yer kabuğundaki ortalama ($\mu\text{g/g}$) olarak Cd : 0.1, Cr:69, Cu:39, Pb:17, Zn:67, Co:20, Ni:80 (Taylor ve McLennan, 1995) dir. Çalışma alanı topraklarının örnekleme noktalarındaki profil ortalamaları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Çalışma alanı topraklarını ağır metal ortalama değerleri

Örnek Noktası	Cd ($\mu\text{g/g}$)	Cr ($\mu\text{g/g}$)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Ni ($\mu\text{g/g}$)	Pb ($\mu\text{g/g}$)	Zn ($\mu\text{g/g}$)	Co ($\mu\text{g/g}$)
T1	0,55	61,01	11,28	111,16	36,37	37,02	14,78
T2	0,61	105,45	17,41	175,79	42,60	46,09	20,20
T3	0,31	88,22	17,92	181,10	25,57	52,51	17,65
T4	0,33	93,41	17,99	189,37	33,82	48,15	18,00
T5	0,33	110,06	20,17	256,61	34,89	51,81	22,09
K1	0,34	105,53	16,73	174,02	35,22	46,80	17,95
K2	0,35	117,52	22,62	222,23	27,00	62,38	23,23
Yer kabuğu ortalama	0.10	69	39	80	17	67	20

Yer kabuğu ağır metal ortalamaları dikkate alındığında kadminyum değerlerinin ortalamasının çok üstünde olduğu (bu durum uygulanan tarımsal girdilerden kaynaklandığı varsayılmaktadır), krom elementinde T1 dışındakilerin ortalamasının üstünde, bakırda ise tüm noktalardaki değerlerin ortalamasının altında olduğu, nikel ve kurşunda tüm noktalardaki değerlerin ortalamasının üstünde olduğu, çinkoda bakırda olduğu gibi tüm noktalardaki değerlerin ortalamasının altında olduğu, kobaltta ise T2, T5 ve K2 noktalarının ortalamasının üstünde diğer örnekleme noktalarının ise ortalamasının altında olduğu belirlenmiştir. Çalışma alanı topraklarındaki nikel içeriği toprak kirliliği yönetmeliğinde (75 mg/kg) belirtilen değer çok üstündedir. Olivin, hornblend ve augit mineralleri nikel (Ni), çinko (Zn), vanadium (V), kurşun (Pb) ve bakır (Cu) içerirler. Tamgaç ve ark. (1995) bölgede metamorfiklerin olduğunu ve bazı fasiyelerin içinde serpantinleri tanımlamıştır. Nikelin litolojik olarak serpantinlerden gelebileceği düşünülmüştür. Tüm örnekleme noktalarındaki ortalama ağır metal analiz sonuçları değerlendirildiğinde Ni>Cr>Zn>Pb>Co>Cu>Cd sıralaması belirlenmiştir. Lantzy ve Mackenzie (1979) antropojenik kökenli Cu, Cd, Zn, Pb'nın doğal kaynaklı katılımdan daha fazla olduğunu bildirmiştir.

Çizelge 3 incelendiğinde çalışma alanı topraklarında ayrışma düzeyleri görülmektedir. Modeller farklı özelliklerdeki kaya ve topraklarda farklı sonuçlar vermektedir. Uygulanan 8 indisten dört tanesinde (CIA, CIW, PIA ve Vogt) sonuçların benzer olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre en yüksek en düşüğe göre sıralama; T3, T4, T5, K2, K1, T1-T2 şeklindedir. CIA, CIW ve PIA indeksleri feldispat minerallerinin kil minerallerine dönüşümlerinin ölçülmesinde ana ayrışma indisleri olarak kullanılmaktadırlar. Price ve Velbel (2003), felsik metamorfik anakaya üzerinde oluşan toprak profillerinde farklı ayrışma indislerini uygulamışlar ve kullandıkları indislerden WIP'nin heterojen ana kayalardan oluşan topraklara daha uygun olduğunu, CIA, CIW, PIA ve V indeksinin ise hidrotermal oluşumlar gibi jeokimyasal değişimlere daha uygun olduğunu bildirmişlerdir. Kontrol noktalarından K2'de ayrışma daha yüksektir. Bu durum bu noktanın yaşlı teras üzerinde yer alması ile ilgili olup beklenen sonuçtur. Wagner ve ark. (2007) teras seviyesinin yüksek olduğu yerlerde yüksek indis

Hidrotermal Akışkanlarca Etkilenen Toprakların Ağır Metal İçeriği ve Jeokimyasal Ayrışma Düzeyleri (Sarayköy-Denizli Örneği)

değeri, alt teras seviyelerinde daha düşük değerler bulunmuştur. Bu sonuçlar K1 ve K2 noktaları arasındaki farkı açıklamaktadır. T3 noktası çalışma alanında en düşük kotta yer almaktadır. Yoğunlaşan hava tabakasından en fazla etkilenen bu noktadaki yüksek ayrışma diğer toprak özellikleri dikkate alındığında tamamen jeolojik akışkanlardan kaynaklanmaktadır. Sıcaklık kimyasal reaksiyonların hızını artırmaktadır. Bu alanda oluşan mikroklimatik yüksek sıcaklık kimyasal ayrışmayı artırmış ve ilk aşamada çözünen elementlerin toprak çözeltisine geçerek ortamdan uzaklaşmasına yol açmıştır. Benzer şekilde ayrışma etkisi ile bu noktadaki ağır metal konsantrasyonunda T4 ve T5 noktalarına göre daha düşüktür.

Sonuç

Denizli-Aydın ili sınırları içerisinde yer alan Sarayönü-Buharkent bölgesinde yürütülen bu çalışmada hidrotermal akışkanlardan etkilenen topraklarda ağır metal içerikleri ve kimyasal ayrışma düzeyleri incelenmiştir. Üç farklı fizyografyada yer alan 7 farklı noktada profil derinliğinde toprak örnekleme yapılmıştır. Tüm örnekleme noktaları değerlendirildiğinde Ni>Cr>Zn>Pb>Co>Cu>Cd konsantrasyon sıralaması oluşmuştur. En yüksek ağır metal konsantrasyonu jeotermal elektrik üretim tesislerine en yakın olan T5 ve K2 noktaların, en düşük içerik ise T1 ve T3 noktalarında görülmüştür. Ortalama ağır metal konsantrasyonu en düşük olan örnekleme noktası, grabende sağ sahilde etek düzünde tanımlanan diğer noktalara göre farklı ana materyal üzerinde oluşmuş T1 noktasında tesbit edilmiştir. Bu farklılık tamamen litolojik özelliklerden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık en yüksek değerler ise T5 ve takiben K2 noktasında (Denizli-Aydın karayoluna en yakın iki örnek) belirlenmiştir. Özellikle T5 noktası jeotermal enerji üretim tesislerine en yakın konumda bulunmakta ve tesisten çıkan buhar ve yoğunlaşmadan en fazla etkilenmektedir. Bu noktadaki metal fazlalığı en yüksek jeotermal etkileşimden kaynaklanmaktadır.

Çalışma alanı topraklarında jeotermal etkileşimin kimyasal ayrışma üzerindeki etkisini değerlendirmek için 8 ayrışma indisi uygulanmıştır. Literatürde CIA, CIW, PIA ve V indeksinin ise hidrotermal oluşumlarda daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir. Nitekim yapılan çalışmada da bu indislerin sonuçları daha duyarlı ve benzer olduğu görülmüştür. Bu değerlendirmeye göre ayrışma sıralaması T3, T4, T5, K2, K1, T1-T2 şeklindedir. Hidrotermal akışkanların neden olduğu mikroklimatik yüksek sıcaklık zonu en çukur lokasyonda bulunan T3 noktasında beklenildiği gibi en yüksek kimyasal ayrışmanın gerçekleşmesine neden olmuştur. En düşük ayrışma ise daha yüksek kotlarda bulunan ve hidrotermal elektrik üretim tesislerine en uzak noktadaki T1-T2 noktalarında görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir (Proje numarası: FYL-2019-2847)

Kaynaklar

- Aiuppa, A., Allard, P., D'Alessandro, W., Michel, A., Parello, F., Treuil, M., Valenza, M., 2000. Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering and groundwater transport at Mt. Etna volcano (Sicily). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(11), 1827-1841.
- Aslan, E., 2010. Alangüllü (Aydın) Jeotermal Kaynağının Kimyasal Özellikleri ve Çevreye Olan Etkilerinin Uzaktan Algılama ve CBS Kullanılarak Belirlenmesi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Barnes, H. L., 1979. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, John Wiley and Sons, New York. p 798.
- Barut, İ., F., N., Erdoğan, B., .B., Erol, F., D., Güneri, 2013. Geçmişten günümüze Denizli termal mineralli sularının hidrokimyasal özellikleri ile kullanımının değerlendirilmesi. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, C.26, S.1. s1-24.
- Baulun, B., Mayayo, J.M., Fernandez-Nieto, C., Lopez, G.M.J., 2000. Geochemistry of Precambrian and Paleozoic Siliciclastic Rocks from The Iberian Range (NE Spain). Implications for Source-Area Weathering, Sorting, Provenance, and Tectonic Setting. *Chemical Geology*. 168: 135-150.
- Birkeland, P.W., 1999. *Soils and Geomorphology*, 3rd ed. Oxford Univ. Press, New York.
- Boothroyd, I.K.G., 2009. Ecological characteristics and management of geothermal systems of the Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geothermics*, 38:200-209.
- Ertürk, F., Akkoyunlu, A., Varınca, K. B. 2006. Enerji üretimi ve çevresel etkileri, stratejik rapor. Türkiye Stratejik Araştırma Merkezi, İstanbul.
- Everest, T., Özcan, H., 2019. Applying multivariate statistics for identification of groundwater resources and qualities in NW Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 191(2), 47.
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and
- Fiantis, D., M. Nelson, J. Shamshuddin, T.B. Goth, E. Van Rants, 2010. Determination of the geochemical weathering indices and trace elements content of new volcanic ash deposits from Mt. Talang (West Sumatra) Indonesia. *Eurasian Soil Science*, Vol:43, No:13, pp.1477-1485.
- Haklıdır, F.T., R. Sengun, J.R. Haizlip, 2015. The geochemistry of the deep reservoir wells in Kızıldere (Denizli City) geothermal field (Turkey). *Proceedings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, 19-25 April.
- Harnois, L., 1988. The CIW index: a new Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology* 55, 319– 322.
- Lantzy, R., J., Mackenzie, F., T., 1979. *Geochim. Cosmochim. Acta* 43, 511.
- Liu Z., H. Wang, W.S. Hantoro, E. Sathamurty, C. Colin, Y. Zhao, J. Li, 2012. Climatic and tectonic controls on chemical weathering in tropical Southeast Asia (Malay Peninsula, Borneo, and Sumatra). *Chemical Geology*. 291, 1-12.
- Markusson, S.H., A. Stefansson, 2011. Geothermal surface alteration of basalts, Krysuvik Iceland-alteration-mineralogy, water chemistry and the effects of acid supply on the alteration process. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 206, 46-59.
- Nesbitt, H.W., and Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299 (5885), 715–717.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on tectonodynamic
- paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921 -924.
- Parker, A., 1970. An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine* 107, 501 -504
- Poyraz, G., 2016. Aydın Buharkent yöresinde jeotermal sularla sulanan toprak ve bitki örneklerinde bazı kirletici parametrelerin araştırılması. Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- Price, J.R., M.A. Velbel, 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*. 202, 397-416.

- Reiche, R. 1950. Survey of Weathering Processes and Products. University of New Mexico Publication in Geology. The University of New Mexico Press.
- Ruxton, B.P., 1968. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *Journal of Geology* 76, 5 18-527.
- Şamilgil, E., 1992 "Jeotermal Enerji". Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, İstanbul.
- Tamgaç, Ö.F., Yıldırım, N., Çetiner, L., 1995. Denizli-Karahayit-Pamukkale ve Çevresi Sıcaksu Kaynaklarının Korunması ve Geliştirilmesine Ait Hidrojeoloji Etüt Raporu, MTA Derleme No:9942, Ankara.
- Vogt, T., 1927. Sulitjelmafeltets geologi og petrografi. *Norges Geologiske Undersøkelse* 12 1, 1 -560 (in Norwegian, with English abstract).
- Wagner, S., Costantini, E.A.C., Sauer, D., Stahr, K., 2007. Soil Genesis in A Marine Terrace Sequence of Sicily, Italy. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V: 24, núm: 2, 2007, P: 247-260.