



Araştırma Makalesi / Research Article

Nalbantlar Ovası (Söke, Aydın) Yeraltı Suyu ve Tarım Toprakları İnorganik Kalite Araştırması: Arsenik ve Uranyum Tehlikesi

Inorganic Quality Study of Groundwater and Agricultural Soils on Nalbantlar Plain (Söke, Aydın): Arsenic and Uranium Hazard

Anıl KÜÇÜKSÜMBÜL¹ , Gültekin TARCAN¹ 

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 35390 İzmir

Geliş (Received): 09 Ağustos (August) 2021 / Düzeltme (Revised): 08 Ekim (October) 2021 / Kabul (Accepted): 1 Kasım (November) 2021

ÖZ

Bu çalışma, Batı Anadolu'da Aydın iline bağlı Söke Ovası doğusunda yer alan ovalarda tarım toprağı ve yeraltı suyu kalitelerinin incelenmesi ile insan sağlığı üzerindeki etkisinin araştırılmasını kapsamaktadır. İnceleme alanı ve çevresindeki jeolojik yapının temelini Menderes Masifi kayaçları oluşturmaktadır. Bölgede yüzeylenen gnays, granitoid ve şist metamorfik kayaçları; su ve toprakların kimyasını belirleyen önemli parametrelerdir. Suların içme amaçlı tüketiminde; çözülmüş As, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, U ve Zn değerlerinin kanserojen olan/olmayan toplam sağlık riski hesaplanmıştır. Yeraltı sularının kirlenmesine neden olan antropojenik ve jeojenik girdiler ayırt edilmiştir. Ek olarak, sularda majör iyonlar (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄, HCO₃) ve birçok eser element (Ag, Al, Co, Fe, Ge, Mn, Pd, Rb, Se, Si, Sr, Ta, Tl ve V) analiz edilmiştir. Tarım topraklarının As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, U ve Zn değerleri analiz edilmiştir. Söke Ovası topraklarının elementçe zenginleşme faktörleri hesaplanarak temel değerler ile karşılaştırılmıştır. Toprakların solunması, yutulması ve deriyle teması yoluyla oluşan kanserojen olan/olmayan toplam sağlık riski hesaplanmıştır. Bazı yeraltı suları gnays biriminden kaynaklı olduğu belirlenen, ortalamanın çok üzerinde çözülmüş uranyum ve arsenik içermektedir. Ovada, yeraltı suyu kuyularının derinliği arttıkça çözülmüş uranyum miktarında artış söz konusudur. Sınır değerinin (30 µg/L) 3 katı kadar uranyum içeren yeraltı suyu, Karacahayıt bölgesinde içme amaçlı tüketilmektedir. Yeşilköy, Karacahayıt ve Kisir mahallerinde yasal sınırın üzerinde (sırasıyla 23.1, 24.1 ve 61.1 µg/L) arsenik içeren yeraltı suyu, içme amaçlı tüketilmektedir. İçme amaçlı tüketilen yeraltı sularında en yüksek kanser riski arsenik için 2.07E-03 olarak Kisir bölgesinde belirlenmiştir. Tarım topraklarında en yüksek kanser riski arsenik için 2.38E-04 olarak Sayrakçı bölgesinde belirlenmiştir. Sağlık açısından riskli olan suları tüketen ve topraklarda tarım etkinliğinde bulunan yöre halkının sağlık durumu araştırılmalı ve çözüm önerileri uygulanmalıdır.

Anahtar Kelimeler: İnsan Sağlığı Risk Değerlendirmesi, Su Kimyası, Su Kirliliği, Kanser, Toprak Kirliliği, Yeraltı suyu

ABSTRACT

This study includes the investigation of the quality of agricultural soils and groundwater in the plains located in the east of Söke Plain in Aydın province in Western Anatolia and the detection of its effect on human health. The rocks belonging to the Menderes Massif form the basis of the geological structure in the study area and surrounding. Metamorphic rocks composed of gneiss, granitoid and rocks outcropping in the region are essential parameters

determining the water and soils' chemistry. The total carcinogenic and non-carcinogenic health risk values of waters were calculated for dissolved As, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, U and Zn. Anthropogenic and geogenic inputs that cause groundwater contamination were distinguished. Also, major ions (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄, HCO₃) and many trace elements (Ag, Al, Co, Fe, Ge, Mn, Pd, Rb, Se, Si, Sr, Ta, Tl and V) were analyzed. Collected soil samples were analyzed for As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, U and Zn. The elemental enrichment factors of Söke Plain soils were calculated and compared with the background values. Carcinogenic and non-carcinogenic total health risks, which is occurred by inhalation, ingestion and dermal contact of soil, were calculated. Some groundwater contains above-average dissolved uranium and arsenic, which are determined to originate from the gneiss unit. In the plain, the abundance of dissolved uranium increases as the depth of groundwater wells rises. Groundwater containing uranium 3 times the limit value (30 µg/L) is consumed for drinking purposes in the Karacahayıt region. Groundwater containing arsenic above the allowed limit in Yeşilköy, Karacahayıt and Kisir regions (23.1, 24.1 and 61.1 µg/L, respectively) is consumed for drinking purposes. The highest cancer risk for As in groundwater consumed for drinking was found to be 2.07E-03 in Kisir. The highest cancer risk for As in agricultural soil was found to be 2.38E-04 in Sayrakçı. The local people health status who work on soil with health risks and consume carcinogenic waters should be investigated, and suggestions for the solution should be implemented.

Keywords: Human Health Risk Assessment, Water Chemistry, Water Contamination, Cancer, Soil Contamination, Groundwater

GİRİŞ

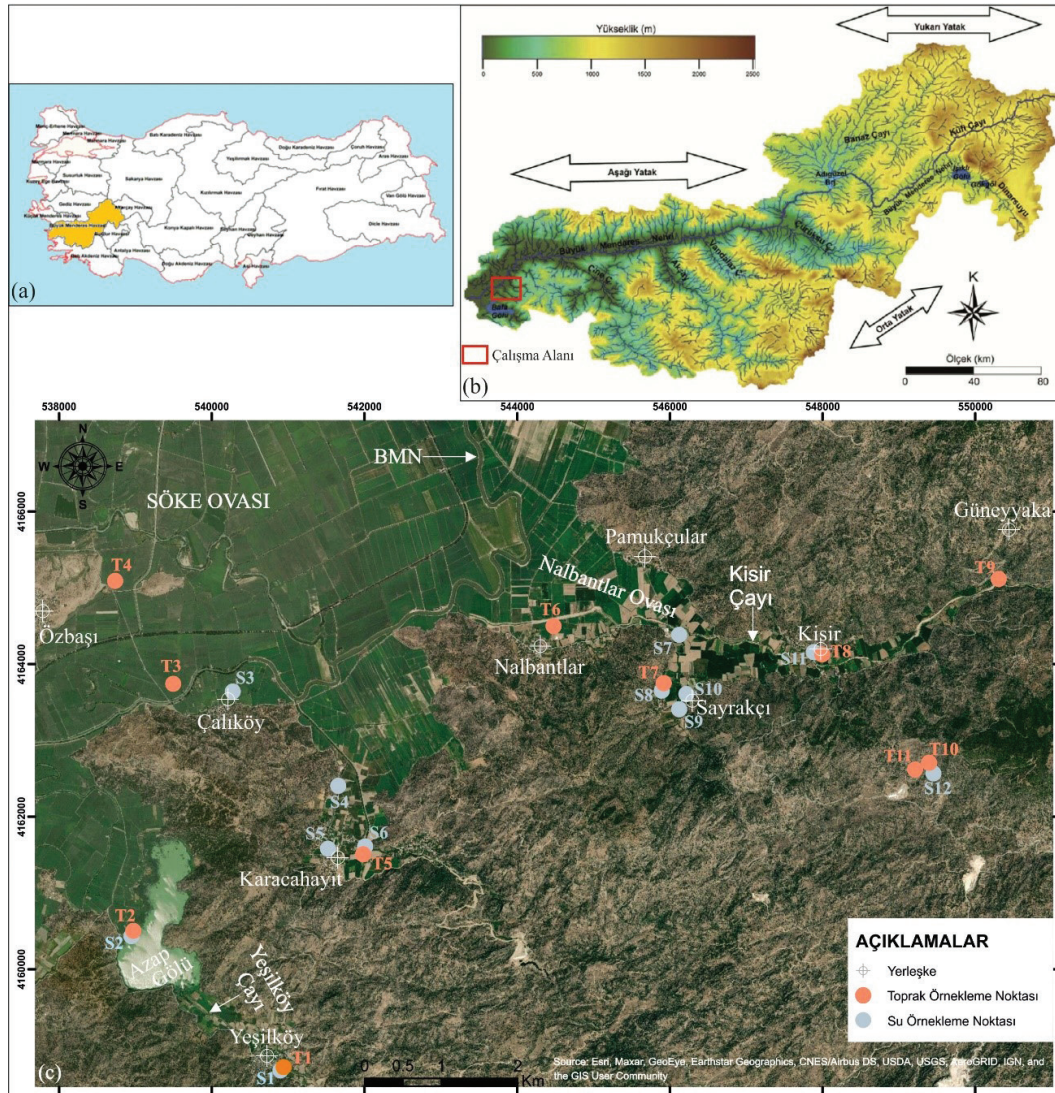
İçme, sulama ve/veya hayvancılık amacıyla kullanılan yüzey ve yeraltı suları ile tarımsal faaliyette kullanılan toprağın korunması insanlığın hayatta kalması için vazgeçilmezdir. Jeojenik ve antropojenik girdiler nedeniyle su ve toprakta, kimyasal elementlerin birikimi gerçekleşmektedir. Jeolojik süreçler engellenemese bile olası etkisinin araştırılması, halk sağlığı ve sürdürülebilir kaynak yönetimi için gerekliliktir.

Çalışma alanı Söke – Koçarlı Ovası 2. Kısım olarak anılan Azap Gölü kuzeydoğusundaki Nalbantlar Ovası, Karacahayıt bölgesi ve güneydoğusundaki Yeşilköy Ovası'nı kapsamaktadır (Şekil 1). Küçüksümbül vd. (2022) tarafından Söke Ovası su ve topraklarının kimyasal analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Azap Gölü ve çevresinde gnays biriminden kaynaklı jeojenik kirlenme rapor edilmiştir. Söke Ovası'nın su ve topraklarını kapsayan çalışmanın ardından jeojenik kirlenme beklenen yerleşkelere odaklanılmıştır. İçme, sulama, hayvancılık amaçlı kullanılan yeraltı suları ve tarım yapılan

topraklardan örneklemeler yapılmıştır. Söke Ovası'ndan farklı biçimde Büyük Menderes Nehri (BMN) sularından bağımsız olarak Kisir Çayı ve yağışlı dönem dereleri ile beslenen ovalarda, birçok noktada üretim sağlanan yeraltı suyu kuyuları bulunmaktadır. Kisir, Sayrakçı, Nalbantlar, Karacahayıt, Çalıköy ve Yeşilköy bölgesindeki örneklemeler üzerinden su ve toprak kalitesi araştırılmıştır. Jeolojik etki göz önünde bulundurularak yeraltı suyu ve tarım topraklarının inorganik madde bolluğunun nedenleri ve insan sağlığına uygunluğu değerlendirilmiştir.

YÖNTEM VE MATERYAL

Yerleşim bölgelerinden 9 adet su ve 8 adet toprak örnekleme yapılmıştır. Su ve toprak örnek noktaları literatürden alınanlarla birlikte Şekil 1 ve 2'de gösterilmiştir. Taze formasyon suyu örneklemeleri, kuyularda 15 dakika süren su çekimi ardından yapılmıştır. Elektriksel iletkenlik, pH ve sıcaklık değerleri arazide multimetre aracılığıyla ölçülmüştür. Tüm su örnekleri, yüksek yoğunluklu polietilen şişelere örneklenmiş olup 4 °C'de korunmuştur.



Şekil 1. (a) Büyük Menderes Havzası'nın konumu, (b) Büyük Menderes Havzası ve çalışma alanının havzadaki konumu (Kazancı vd., 2011), (c) Çalışma alanının uydu görüntüsü ve örnekleme noktalarının yeri.

Figure 1. (a) Location of Büyük Menderes Basin, (b) Büyük Menderes Basin and location of the study area in the Basin, (c) Satellite image of the study area and location of the sampling points.

Majör kation (Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^+) analizleri Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Jeokimya Laboratuvarında Atomik Absorpsiyon Spektrofotometresi cihazında gerçekleştirilmiştir. Majör anyon (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}) analizi için volümetrik ve gravimetrik

analiz yöntemleri uygulanmıştır. S1, S6, S8, S10 ve S12 örneklerinin anyon analizlerinde teknik sorunlar yaşanmıştır. İz element analizleri için $0.45 \mu\text{m}$ selüloz filtreler kullanılmış ve örnekler pH değeri 2'ye düşürülene kadar HNO_3 eklenerek asidik hale getirilmiştir.

As, Ag, Al, B, Ba, Cd, Cr, Cu, Co, Fe, Mn, Ni, Pb, Pd, Rb, Se, Si, Sr, Ta, Tl, U, V ve Zn analizleri ICP-MS aracılığıyla S5, S7, S9 ve S11 suları için Hacettepe Üniversitesi Su Kimyası Laboratuvarı'nda; S1, S6, S8, S10 ve S12 suları için ODTÜ Kimyasal Analiz Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Ortalama ölçüm hatası mg/L (ppm) düzeyindeki derişimler için okunan değerin %5'i, µg/L (ppb) düzeyindeki derişimler için okunan değerin %10'u dolayındadır. S2 Azap Gölü ve S13 Büyük Menderes Nehri yüzey suyu örneklemeleri Küçüksümbül vd. (2020)'den, S3 Çalıköy ve S4 Karacahayıt yeraltı suları analizleri Küçüksümbül vd. (2022)'den alınmıştır. S13, Büyük Menderes Nehri'nin Söke Ovası havza girişinden örneklenmiştir. Çalışma alanının yaklaşık 10 km kadar kuzeyinde yer almaktadır. Bu nedenle, yer bulduru ve jeoloji haritasında işaretlenmemiştir. Tarım yapılan topraklarda yüzey kirlenmesi giderildikten sonra (5-15 cm), 8 adet örnekleme yapılmıştır. Metal donanım kullanımından kaçınılmıştır. 80 °C'de kurutulan örnekler, Dokuz Eylül Üniversitesi Jeokimya Laboratuvarında saklanmıştır. Toprakların kimyasal içerikleri, Kanada ACME Laboratuvarı'nda ICP-MS kullanılarak belirlenmiştir. Toprak kimyasında As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Sb, Pb, U ve Zn elementlerine odaklanılmıştır. T2 Azap Gölü sedimanı, T3 Çalıköy ve T4 Özbaşı toprak analizleri Küçüksümbül vd. (2022)'den alınmıştır.

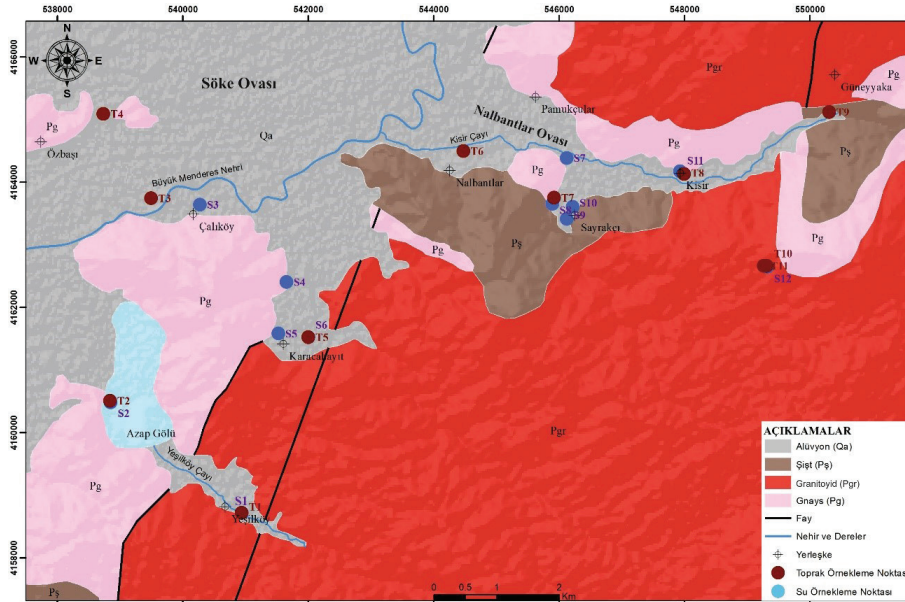
Jeoloji, Hidrokimya, Jeokimya

Çalışma alanı Menderes Masifi içerisinde Söke Grabeni'nin doğu kanadında yer almaktadır. Çalışma alanındaki, en yaşlı kayaç Prekambriyen yaşlı gnayslardır. Gnays birimindeki kuvars damarı ve gnaysa geçişteki kuvarsitlerde aynı yönlü çatlaklarda ikincil uranyum minerallerinin yerleştiği rapor edilmiştir (Öztunalı, 1965). Kisir-Osmankuyu sahasında %0.02-0.03 tenörlü 11.530 ton U_3O_8 , %0.03'den büyük tenörlü

34.365 ton U_3O_8 olmak üzere toplam 45.895 ton muhtemel rezerv rapor edilmiştir (Güney ve Akgül, 2019). Üst Paleozoyik-Prekambriyen yaşlı granitoid ve Paleozoyik yaşlı şişt birimi gnaysları üstlemektedir (Şekil 2). Gnays, granitoid ve şişt birimleri dokanaklar hariç geçirimsiz olma özelliği gösterirler. Bazı tektonik kökenli çatlaklarda yağışlı dönemde yağmur sularının düşük debide yüzeleendiği gözlenmiştir. Kuvaterner yaşlı alüvyon ise drenaj ağındaki kayaçlar ve dere sedimanları ile beslenmektedir. Alüvyon birimi yüksek geçirimlidir. Söke Ovası'nın aksine birçok sığ ve derin kuyudan yeraltı suyu üretimi yapılmaktadır. Bu sular içme, sulama ve hayvancılık gibi farklı amaçlarla değerlendirilmektedir.

Örnekleme Bilgileri ve Analiz Sonuçları

T1 toprağı granitoid biriminde yer alan alüvyon üzerine kurulu Yeşilköy yerleşkesinin tarım toprağını temsil etmektedir. Aynı bölgede içme ve sulama amaçlı kullanılan 12 metre derinliğindeki S1 kuyu suyu örneklenmiştir. T2 göl sedimanı ve S2 su örnekleme Azap Gölü'nün kimyasal karakterini yansıtmaktadır. T3 ve T4 toprakları Büyük Menderes Nehri ile sulanan topraklardır. S3 kuyusu 18 metre derinliğinde olup Çalıköy bölgesinde içme amaçlı tüketilen yeraltı suyudur. Büyük Menderes Nehriyle (S13) beslenmesi olası yeraltı suyudur. S4, S5 ve S6 kuyu suyu örnekleri ise Karacahayıt bölgesinden alınmıştır. S4 ve S6 kuyuları yaklaşık 10 metre derinliğindedir ve içme amaçlı yeraltı suyu üretimi yapılmaktadır. S5 kuyusu 45 metre derinlikte olup içme, sulama ve hayvancılık amaçlı tüketilmektedir. S4 ve S5 yeraltı suları alüvyon-gnays birimi dokanağında yer almaktayken, S6 örnekleme doğrudan bölgedeki alüvyon akiferini temsil etmektedir. T5 toprağı Karacahayıt bölgesi tarım arazilerini temsil eden toprak örneklemesidir.



Şekil 2. Çalışma alanının örnek noktaları işaretlenmiş jeolojik haritası (MTA, 2002).

Figure 2. Geological map of the study area with the sample points marked (MTA, 2002).

T6 toprağı Kısır Çayı yakınından Nalbantlar bölgesindeki tarım topraklarından örneklenmiştir. Şişt birimi ve Kısır Çayı sedimanları ile etkileşim halindedir. S7 kuyusu 10 metre derinlikte olup içme ve sulama amaçlı tüketilmektedir. Gnays birimi ile alüvyon dokanağına yakındır ve Kısır Çayı ile etkileşim halindedir. T7 toprağı gnays birimi yakınında, tarım arazisinden örneklenmiştir. S8, S9 ve S10 yeraltı suyu örneklemeleri ve T7 toprağı Sayrakçı bölgesini temsil etmektedir. 40 metre derinliğindeki S8 kuyusundan üretilen yeraltı suyu sulama amaçlı tüketilmektedirken, 10'ar metre derinlikteki S9 ve S10 kuyularından üretilen yeraltı suları içme amaçlı tüketilmektedir. T8 toprak örnekleme Kısır bölgesinin tarım arazilerini temsil etmektedir. S11 yeraltı suyu ise yaklaşık 10 metre derinlikte kuyudan örneklenmiştir. Bölgedeki yaklaşık aynı derinlikteki birçok kuyu suyu içme amaçlı tüketilmektedir. T9 toprağı ovanın en doğusunda şişt birimi yakınında yer almaktadır. Civarda yeraltı suyu üretim

kuyusuna rastlanmamıştır. Kısır Çayı suları, içme ve sulama amaçlı tüketilmektedir. T10 ve T11 toprak örnekleri ise gnays ve granitoid birimleri dokanağı yakınından örneklenmiştir. Bölgede yeraltı su kuyusu bulunmamakta, tarımsal etkinlik ve yerleşik nüfus düzlüklerle sınırlıdır. S12 kaynağı bölgenin içme ve sulama ihtiyacının karşılandığı düşük debili kaynak suyudur. T10 ve T11 örnekleri birbirine çok yakın noktalardan örnekleme yapılmıştır. T10 toprağı S12 kaynağının çıktığı bölgeyi temsil ederken, T11 toprağı yakınındaki tarım arazisinden örneklenmiştir. Toprak örneklerinin bölgeyi en iyi şekilde temsil edebilmesi için ağıllardan uzakta, herhangi atık ya da gübrenin depolanmadığı alanlar tercih edilmiştir. Su örneklerinin fiziksel parametreleri, kimyasal analiz sonuçları ve kullanım amaçları Çizelge 1'de listelenmiştir. Majör iyonlar (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄ ve HCO₃) mg/L olarak, diğerleri µg/L olarak verilmiştir. Toprak örneklerinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Küçüksümbül, Tarcan

Çizelge 1. Su örneklerinin kullanım amaçları (İ:İçme, S:Sulama, H:Hayvancılık), kuyu derinliği, bazı fiziksel parametreleri ve kimyasal analiz sonuçları (Majör iyonlar mg/L, diğerleri µg/L olarak verilmiştir. En alt satırda yazan değerler, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından içme amaçlı tüketilen suların insan sağlığına uygunluğu için önerilen çözünmüş madde bolluklarıdır.)

Table 1. Intended use of water (İ: Drinking, S: Irrigation, H: Livestock), well depth and chemical analysis results with some physical parameters of waters (Major ion value is given in mg/L, others µg/L. The values written on the bottom line are the dissolved element abundances recommended by the World Health Organization (WHO, 2017) for the suitability of drinking water for human health.)

Kod	Amaç	Derinlik	ÖEI	pH	T (°C)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	As	Ag	Al	B	Ba	Cd	
S1	İ	12 m	365	6.55	17.7	37.0	10.0	3.6	21.0	*	*	*	23.1	1.4	**	**	**	23	**
S2 ^(a)	S	-	590	8.92	13.1	50.1	85.6	23.3	54.6	85	61.7	488.0	27.7	**	7.4	197	40.9	0.09	
S3 ^(b)	İ	18 m	943	7.16	14.1	214.6	32.0	3.3	1.1	56	117.55	605.12	0.6	**	12.0	44.6	37.9	**	
S4 ^(b)	İ	10 m	518	6.8	14.7	108.7	7.9	5.2	1.0	56	110.02	146.4	3.1	**	7.0	84	59.3	**	
S5	İ,S,H	45 m	1268	6.52	19.7	87.6	52.4	37.9	58.3	45	108.25	512.4	24.1	**	7.3	148	124	0.19	
S6	İ	10 m	415	6.30	18.5	24.0	9.8	7.5	27.0	*	*	*	**	**	**	**	**	15.2	**
S7	İ,S	10 m	631	8.17	14.0	145.9	8.9	3.5	1.6	45	73.5	305	6.3	**	7.4	48.6	20.5	0.05	
S8	S	40 m	943	7.09	19.9	107.0	27.0	40.0	34.0	*	*	*	**	**	**	**	**	88	**
S9	İ	15 m	484	8.11	15.4	42.4	27.9	21.0	47.1	40	36.9	280.6	1.5	**	9.0	32.6	70.2	0.08	
S10	İ	10 m	440	7.39	17.0	69.0	9.5	3.6	14.5	*	*	*	**	**	**	**	**	28	**
S11	İ	10 m	225	7.72	12.7	13.8	11.9	15.9	42.0	45	43.5	85.4	61.1	**	13.4	26.9	6.57	0.07	
S12	İ,S	-	290	6.31	10.0	13.3	5.6	2.4	33.0	*	*	*	**	**	0.16	**	**	17.2	**
S13 ^(a)	S,H	-	2110	8.25	14.4	87.0	187.0	38.0	101.0	185	486	573	93.1	0.6	1910	3210	2063	0.30	
WHO						***	***	***	200	250	250	***	10	***	900	2400	1300	3	

Çizelge 1. (devamı)
Table 1. (continued)

Kod	Cr	Cu	Co	Fe	Ge	Li	Mn	Ni	Pb	Pd	Rb	Se	Si	Sr	Ta	Tl	U	V	Zn
S1	**	**	5.6	**	**	0.11	9.8	11.4	3.4	**	4.4	**	7.2	122	**	**	2.8	**	**
S2 ^(a)	0.6	3.5	**	39.6	0.03	12.7	6.3	3.3	2.2	0.2	5.1	0.7	2.4	453	7.3	0.011	3.2	1.9	124
S3 ^(b)	0.4	2.5	**	34.2	0.03	12.5	0.6	14.8	2.1	0.1	21	**	5.9	421	2	0.024	8.6	**	6
S4 ^(b)	0.6	7.7	**	34.2	**	8.1	103.3	2.3	2.6	0.1	4.3	**	5.1	226	1.8	0.012	0.6	0.5	33.6
S5	0.9	6.6	**	35.4	**	19.6	5955	6.3	2.6	0.2	2.9	2.5	3.4	423	2.1	0.01	90	3	81.1
S6	4.6	**	**	**	**	0.28	1	**	1.6	**	2.8	**	17.4	140	**	**	0.1	**	**
S7	0.4	5.3	**	35.4	**	4.5	123.3	1.9	2.2	0.03	0.7	0.8	9.2	236	3.3	0.003	12	0.6	15.4
S8	**	**	**	**	**	0.12	10.5	**	2.5	**	4.7	**	10.2	218	**	**	36	**	**
S9	0.5	7.2	**	35.2	**	3.5	3.5	2.2	2.2	0.03	1.2	1.6	1.9	185	4.1	0.017	23	0.1	97
S10	5.2	**	**	**	**	0.11	0.286	**	5.3	**	*	**	6.6	116	**	**	3.6	**	**
S11	0.2	1.8	**	31.4	0.07	15.5	2	2.6	2.1	**	2.3	**	2.4	56	2.8	0.015	14	0.4	9.6
S12	**	**	5.7	5.7	25	0.12	39	5.1	1.6	**	70	**	15.1	**	**	**	36	**	**
S13 ^(a)	8.4	57.0	**	199	0.4	109	4.6	38.0	38.9	1.7	31.0	**	11.6	16140	16.9	0.114	6.4	4.0	200.1
WHO	50	2000	***	***	***	***	***	70	10	***	***	40	***	***	***	***	30	***	***

^(a): Küçüksümbül vd. 2020, ^(b): Küçüksümbül vd. 2022, *: Teknik aksaklık nedeniyle analiz edilememiştir. **: Cihazın algılama limiti altında kalan sonuçları ifade etmektedir. İlgili laboratuvar tarafından alüminyum 40, arsenik 1, bakır 0.5, bor 30, çinko 30, demir 40, germanyum 0.9, gümüş 0.1, kadmiyum 0.03, kobalt 5, krom 1, nikel 0.1, paladyum 0.2, rubidyum 0.09, selenyum 11, stronsiyum 50, talyum 0.03, tantal 0.03, vanadyum 0.1 µg/L olarak rapor edilmiştir. ***: Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından içme amaçlı tüketim için herhangi limit değeri önerilmediğini ifade etmektedir.

Küçüksümbül, Tarcan

Çizelge 2. Toprak örneklerinin kimyasal analiz sonuçları (Söke Ovası ve civarı için kullanılan temel değerler (TD) koyu yazılmıştır. Tüm değerler mg/kg olarak verilmiştir.).

Table 2. Chemical analysis results of soil samples (Background values used for Söke Plain and its surroundings are written in bold. All values are given in mg/kg).

Kod	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	U	Zn
T1	14.9	*	420.9	13.7	3.7	*	8.5	10.5	0.50	4.6	18.0
T2 ^a	36.9	0.03	16.4	54.7	23.9	0.007	20.9	2.7	0.42	1.4	16.7
T3 ^a	9.7	0.13	22.3	561.1	19.2	0.031	274.2	9.1	0.35	0.9	42.9
T4 ^a	14.8	0.18	28.7	355.8	29.6	0.065	305.4	14.3	0.36	1.9	57.2
T5	4.3	*	191.6	20.5	5.2	*	9.3	6.6	0.50	3.4	25.0
T6	29.2	0.19	19.8	61.6	21.7	0.038	24.7	9.7	6.77	2.3	57.7
T7	32.4	0.2	89.3	61.6	23.4	*	25.4	12.4	1.60	3.5	89.0
T8	11.0	0.15	14.0	68.4	20.7	0.056	23.5	10.6	0.59	5.2	55.8
T9	6.1	*	95.0	34.2	10.9	*	14.7	5.1	0.40	2.9	31.0
T10	9.6	*	69.3	27.4	9.1	*	9.5	12.2	0.20	14.7	26.0
T11	2.1	*	94.7	13.7	4.5	*	5.7	6.1	0.10	5.7	15.0
TD^a	7.5	0.12	26	200	22	0.09	150	15	0.35	2.1	40

^a: Küçüksümbül vd. 2022'den alınmıştır.

*: Cihazın algılama limiti altında kalan sonuçları ifade etmektedir. Kadmiyum için 0.1 mg/kg, cıva için 0.01 mg/kg olarak rapor edilmiştir.

Toprak Kirliliği Değerlendirme Kriterleri

Metal ve yarı metallerce zengin kayaçların ayrışması, ana jeojenik girdilerin nedeni olarak açıklanabilir. Noktasal olarak herhangi zenginleşme olup olmadığının anlaşılabilmesi için, bölgedeki kayaçların kimyası göz önünde bulundurularak insan etkinliğinin kısıtlı olduğu topraklardan alınan örneklerden temel değer oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada, Söke Ovası drenaj ağındaki kayaçlar (mermer, karbonat, gnays) ve topraklar üzerinden hesaplanan temel değer kullanılmıştır (Küçüksümbül vd., 2022). Topraktaki kirlenici maddelerin üst limit değerleri devletler tarafından yasallaştırılmaktadır. Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) gibi bazı uluslararası kuruluşlar tarafından yapılan çalışmalarla da sınır değerler önerilmektedir. Türkiye (TS, 2010), Finlandiya (MEF, 2007), Kanada (CSQG, 2010) ile Gıda ve Tarım Örgütü (FAO, 2007) tarafından kullanılan limit değerler ve literatür taraması

sonucu elde edilen üst kıtasal kabuk ortalama değerleri (Goldschmidt, 1937; Turekian ve Wedepohl, 1961; Wedepohl, 1995; McLennan, 2001; Rudnick vd., 2003), Söke Ovası temel değerleri ile birlikte Çizelge 3'de listelenmiştir.

Zenginleşme Faktörü

Zenginleşme faktörü (ZF), kontaminasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Çevik vd., 2009; Bourennane vd., 2010; Zhao vd., 2015; Sakan vd., 2016; Akinci vd., 2019). ZF, topraktaki metal birikimini matematiksel olarak ifade etmek için kullanılır. Bu yöntem; arsenik (As), kadmiyum (Cd), kobalt (Co), krom (Cr), bakır (Cu), cıva (Hg), nikel (Ni), kurşun (Pb), antimon (Sb), uranyum (U) ve çinko (Zn) olmak üzere 11 element içinde kullanılmıştır. Zenginleşme faktörü değeri, aşağıdaki yer alan eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır (Sutherland, 2000):

Çizelge 3. Eser elementlerin literatürdeki üst kıtasal kabuk değerleri (a), Söke Ovası temel değeri ve toprak numunelerinin en düşük, en fazla ve ortalama değerleri (b), Türkiye (TS), Finlandiya (MEF), Kanada (CSQG) ve Birleşmiş Milletler (FAO) tarımsal toprak eşik değerleri (c) (Tüm değerler mg/kg olarak verilmiştir).

Table 3. Trace element composition of the upper continental crust in literature (a), background value (TD) suggested in this study and minimum, maximum, average values of metal(loid)s accumulation of soil samples (b), threshold values of agricultural soil quality regulations of Turkey (TS), Finland (MEF), Canada (CSQG), and the United Nations (FAO) (c) (All values are given in mg/kg).

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	U	V	Zn
(a) Goldschmidt (1937)	5	0.5	40	200	100	0.5	100	16	1	4.0	100	40
Turekian ve Wedepohl (1961)	13	0.3	19	90	45	0.4	68	20	1.5	3.7	130	95
Wedepohl (1995)	2	0.102	11.6	35	14.3	0.056	18.6	17	0.31	2.5	53	52
McLennan (2001)	1.5	0.098	17	83	25	-	44	-	0.2	2.8	107	71
Rudnick vd. (2003)	4.8	0.09	17.3	92	28	0.05	47	17	0.4	2.7	97	67
(b) Temel Değer*	7.5	0.12	26	200	22	0.09	150	15	0.35	2.1	45	40
En düşük	2.1	0.03	14	13.7	3.7	<0.01	5.7	2.7	0.10	0.9	12	15
En fazla	36.9	0.20	420.9	561.1	29.6	0.065	305.4	14.3	6.77	14.7	61	89
Ortalama	15.5	-	96.5	115.7	15.6	-	65.6	9.0	1.07	4.2	27.5	39.5
(c) TS (2010)	3	27	5	10	514	3	13	135	2	-	256	6811
MEF (2007)	5	1	20	100	100	0.5	50	60	2	-	100	200
CSQG (2010)	12	1.4	40	64	63	6.6	45	70	20	23	130	250
FAO (2007)	1	1	-	100	200	2	100	200	-	-	-	150

*: Küçüksümbül vd. (2022)'den alınmıştır.

$$ZF = \frac{\left(\frac{C_n}{C_{ref}}\right)_{\text{Toprak}}}{\left(\frac{B_n}{B_{ref}}\right)_{\text{Temel Değer}}} \quad (1)$$

C_n seçilen elementin her topraktaki bolluğu (Çizelge 2), C_{ref} her topraktaki referans elementin bolluğu, B_n hesaplanan temel değeri (Çizelge 3), referans elementin bolluğudur. Çalışma kapsamında referans element olarak alüminyum (Al) seçilmiştir. Sutherland (2000)'e

göre ZF değeri 2'den küçük olduğunda, toprakta minimum zenginleşme veya hiç zenginleşme yok olarak sınıflandırılır. Zhang ve Liu (2002) tarafından yapılan çalışmada 0.5 ile 1.5 arasındaki eser element bolluğu, zenginleşmenin tamamen doğal süreçlerden kaynaklandığını göstermektedir. Bu nedenle, zenginleşme katsayısı 1.5 ila 2 olan topraklar, düşük kirlenme olarak gruplandırılmıştır. 2 ile 5 arası değerler

kısmen kirlenme, 5 ile 20 arası önemli ölçüde kirlenme, 20 ile 40 arası fazlasıyla kirlenme ve 40'dan büyük değerler ise aşırı derece kirlenme olarak sınıflandırılır (Sutherland, 2000).

Toprakların İnsan Sağlığı Risk Değerlendirmesi

Toprakta kaynaklanabilecek kanserojen risk (KR) ve kanserojen olmayan risk katsayısı (RK) soluma, yutma (oral yolla) ve deriyle temas olarak 3 kategoride incelenmektedir (Lim vd., 2008, Wongsosuluk vd., 2014, Peña-Fernández vd., 2014). Kanserojen olmayan toplam risk (TRK) 3 kategorinin toplanması ile elde edilir. 1'den büyük olması riskli kabul edilir (US EPA, 1992). Her kategori için farklı hesaplamalar yapılmaktadır. Günlük kronik alım (GKA) değerinin, oral referans doza (RfD) bölünmesi ile oral yolla ve deri ile temasla gerçekleşebilecek kanserojen olmayan risk hesaplanabilmektedir. GKA değerinin referans konsantrasyona (RfC) bölünmesi ile soluma yoluyla gerçekleşebilecek kanserojen olmayan risk hesaplanabilmektedir. GKA değerinin eğim faktörü (SP) ile çarpılmasıyla ise kanser riski (KR) belirlenebilmektedir (RAIS, 2021a). İlgili eşitlikler aşağıda sıralanmıştır. Eşitliklerdeki kısaltmaların tanımları, birimleri ve değerleri (US EPA, 2004). ile referans doz (RfD), referans konsantrasyon (RfC) ve eğim faktörü (SP) değerleri (US EPA IRIS, 2021). Çizelge 4 ve 5'te listelenmiştir. Cıvanın (Hg) oral referans doz değeri (RfD_{oral}) ile kurşunun (Pb) eğim faktör değeri (SF_{oral}) RAIS (2021b)'den alınmıştır. Kadmiyum (Cd), kobalt (Co), krom (Cr), nikel (Ni) için eğim faktör değerleri (SF_{soluma}) Ferreira-Baptista ve De Miguel (2005)'den ve kurşunun (Pb) oral referans doz değeri (RfD_{oral}) Peña-Fernández vd. (2014)'den alınmıştır. Deriyle temasın referans doz değerinin hesabı için RfD_{oral} değeri ABS_{GI} ile çarpılmış olup deriyle temasta kullanılacak eğim faktörü ise SF_{oral} değerinin

ABS_{GI} değerine bölümü ile bulunabilmektedir (RAIS, 2021a). Çocuklar için; maruz kalma süresi (ED) 6 yıl, vücut ağırlığı (BW) 6 kg, yutma oranı (Oral_R) 100 mg/gün, soluma oranı (Soluma_R) 7.6 m³/gün ve maruz kalan cilt yüzey alanı (SA) 2200 cm² olarak hesaplanmıştır. Deri emilim faktörü (ABS_d) arsenik için 0.03, diğerleri için ise 0.001 olarak alınmıştır (Ferreira-Baptista ve De Miguel, 2005; Luo vd., 2012).

$$GKA_{soluma} = \frac{C \times EF \times Soluma_R \times ED}{PEF \times 24 \times AT_{nc}} \quad (2)$$

$$GKA_{oral} = \frac{C \times Oral_R \times EF \times ED \times CF}{BW \times LT} \quad (3)$$

$$GKA_{deri} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS_d \times EF \times ED}{BW \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$RK = \frac{GKA}{Rfd} \quad (5)$$

$$TRK = \sum RK_{soluma} + RK_{oral} + RK_{deri} \quad (6)$$

$$KR = GKA \times SF \quad (7)$$

Su Kirliliği Değerlendirme Kriterleri

İçme sularındaki kirletici maddelerin üst limit değerleri devletler tarafından yasallaştırılmaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) gibi bazı uluslararası kuruluşlar tarafından yapılan çalışmalarla da kılavuz değerler önerilmektedir. Evrensel olarak kabul gören genel bir standart olmamakla birlikte birçok limit değer konusunda yasalar ve uluslararası kuruluşlar hem fikir olmuş denilebilir. Bu çalışma kapsamında Avrupa Birliği (EU, 2014), Türkiye (TS, 2013), Amerika Birleşik Devletleri (US EPA, 2018) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) tarafından önerilen limit değerleri karşılaştırılmıştır. Suların oral referans doz değeri (Pena-Fernandez vd., 2014; US EPA IRIS, 2021) ve eğim faktörleri (Ferreira-Baptista ve De Miguel, 2005; RAIS 2021b; US EPA IRIS, 2021) Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 4. Eşitliklerde kullanılan kısaltmaların tanımı, birimi ve değerleri.

Table 4. Definitions, units and values of abbreviations used in mention equations.

Kısaltma	Tanım	Birim	Değer
ABS _d	Deri emilim faktörü	-	As için 0.03, diğerleri 0.001
AF	Cilde tutunma faktörü	mg/cm ²	0.2
AT _c	Ortalama Zaman	gün	LT
AT _{nc}	Ortalama Zaman	gün	ED
BW	Vücut Ağırlığı	kg	70
C	Madde Bolluğu	mg/kg	Çizelge 2
CF	Dönüşüm Faktörü	-	1.00E-05
ED	Maruz kalma Süresi	yıl	40
EF	Maruz kalma Sıklığı	gün/yıl	313
ET	Maruz kalma Zamanı	sa/gün	24
Oral _R	Yutma Oranı	mg/gün	200
Soluma _R	Soluma Oranı	m ³ /gün	20
LT	Yaşam Süresi	gün	28579
PEF	Partikül Emisyon Faktörü	m ³ /kg	1.36E+09
SA	Maruz kalan cilt yüzey alanı	cm ²	5700
SF	Eğim Faktörü	mg ⁻¹ .gün ⁻¹ .kg	Çizelge 5

Çizelge 5. Eşitliklerde kullanılan referans doz (RfD), referans konsantrasyon (RfC), eğim faktörü (SF) ve absorpsiyon oranı (ABS_{GI}) değerleri.

Table 5. Reference dose (RfD), reference concentration (RfC), slope factor (SF) and absorption rate (ABS_{GI}) values used in the equations.

	RfD _{oral}	RfC _{soluma}	RfD _{deri}	ABS _{GI}	SF _{oral}	SF _{soluma}	SF _{deri}
As	3.00E-04	1.50E-05	3.00E-04	1	1.50E+00	1.51E+00	1.50E+00
Cd	5.00E-04	1.00E-05	1.25E-05	0.025	-	6.30E+00	-
Co	3.00E-04	6.00E-06	3.00E-04	1	-	9.80E+00	-
Cr	3.00E-03	1.00E-04	7.50E-05	0.025	5.00E-01	4.20E+00	2.00E+01
Cu	4.00E-02	-	4.00E-02	1	-	-	-
Hg	1.60E-04	3.00E-04	1.60E-04	1	-	-	-
Ni	2.00E-02	9.00E-05	8.00E-04	0.04	-	8.40E+00	-
Pb	3.50E-03	-	3.50E-03	1	8.50E-03	-	8.50E-03
Sb	4.00E-04	3.00E-04	6.00E-05	0.15	-	-	-
U	2.00E-04	4.00E-05	2.00E-04	1	-	-	-
Zn	3.00E-01	-	3.00E-01	1	-	-	-

Küçüksümbül, Tarcan

Çizelge 6. Elementlerin oral referans doz (mg.gün.kg^{-1}) ve eğim faktörü değerleri ($\text{mg}^{-1}.\text{gün}^{-1}.\text{kg}$) ile içme suyu limit değerleri (mg/L).

Table 6. Oral reference dose (mg.day.kg^{-1}) and slope factor ($\text{mg}^{-1}.\text{day}^{-1}.\text{kg}$) values of elements with limit values of water for drinking purposes (mg/L).

	As	B	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	U	Zn
Oral Referans Doz (RfD)	0.0003	0.2	0.2	0.0005	0.003	0.04 ^(a)	0.02	0.0035 ^(b)	0.0002	0.3
Son revize (RfD)	1991	2004	2005	1989	1998	-	1991	-	1989	2005
Eğim Faktörü (SF)	1.5	-	-	-	0.5 ^(c)	-	-	0.0085 ^(a)	-	-
WHO (2017)	0.01	2.4	1.3	0.003	0.05	2	0.07	0.01	0.03	-
EU (2014)	0.01	1	-	0.005	0.05	2	0.02	0.01	-	-
US EPA (2018)	0.01	-	2	0.005	0.1	1.3	-	0.015	0.03	-
TS (2013)	0.01	1	-	0.005	0.05	2	0.02	0.01	-	-

^(a): RAIS 2021b, ^(b): Peña-Fernández vd., 2014, ^(c): Ferreira-Baptista ve De Miguel, 2005'den alınmıştır.

Çizelge 7. Günlük kronik alımın (GKA) hesabında kullanılan parametrelerin tanımı, birimi ve değerleri.

Table 7. Definition, unit and values of parameters used in the calculation of chronic daily intake (GKA).

Parametreler	Tanım	Birim	Değer
C	Toplam çözünmüş madde miktarı	$\mu\text{g/L}$	Çizelge 1
IR	Günlük su alım miktarı	L/Gün	3.1
EF	Maruz kalma sıklığı	Gün/Yıl	365
ED	Maruz kalma süresi	Yıl	45
BW	Vücut ağırlığı	Kg	70
LT	Ortalama ömür	Gün	28579
10^{-3}	$\mu\text{g/L}$ değerini mg/L 'ye çevirme amaçlı	-	0.001

İçme Sularının İnsan Sağlığı Risk Değerlendirmesi

Uygulanan yöntem, içme suyunda analiz edilen elementlerin insan sağlığına olan etkisinin matematiksel olarak ifade edilebilmesi için kullanılmaktadır (Wongsasuluk vd., 2014; Saha vd., 2017; Shil ve Shingh, 2019; Prasad vd., 2020). Denklem parametreleri ve değerleri Çizelge 7'de ifade edilmiştir. Günlük kronik alım (GKA)

aşağıda yer alan eşitlik ile hesaplanmaktadır (US EPA, 1992):

$$\text{GKA} = \frac{\text{C} \times 10^{-3} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{LT}} \quad (8)$$

Oral referans doz (RfD) değeri, araştırmalar sonucunda belirlenen dozu ifade eder (US EPA IRIS, 2021). Kanserojen olmayan sağlık riski (TRK), her bir çözünmüş madde için tehlike

katsayısı (HQ) cinsinden ifade edilir. Kural olarak, $HQ \leq 1$ çok az endişe kaynağıdır, ancak $HQ \geq 1$ endişe riski taşıyıcıdır (US EPA 1999). Her elementin risk katsayısı (HQ), aşağıdaki verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$HQ = \frac{GKA}{RfD} \quad (9)$$

Kanserojen risk, bireyin arsenik (As) gibi tehlikeli elementlere ömür boyu maruz kalmasından kaynaklanan herhangi bir kanser türü geliştirme olasılığıdır ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$R_{ca} = GKA \times SF \quad (10)$$

10^{-6} 'dan küçük değerler kanserojen risk açısından kabul edilebilir olarak sınıflandırılır. Tolere edilebilir risk 10^{-6} ile 10^{-4} arasında değişmektedir, bu da 1 milyon kişide bir vaka ile 10 bin kişide bir vaka anlamına gelmektedir (Lim vd., 2008). 10^{-4} 'ün üzerindeki değerler kanserojen etkisi nedeniyle zararlı kabul edilir.

BULGULAR

Toprak Kirliliği

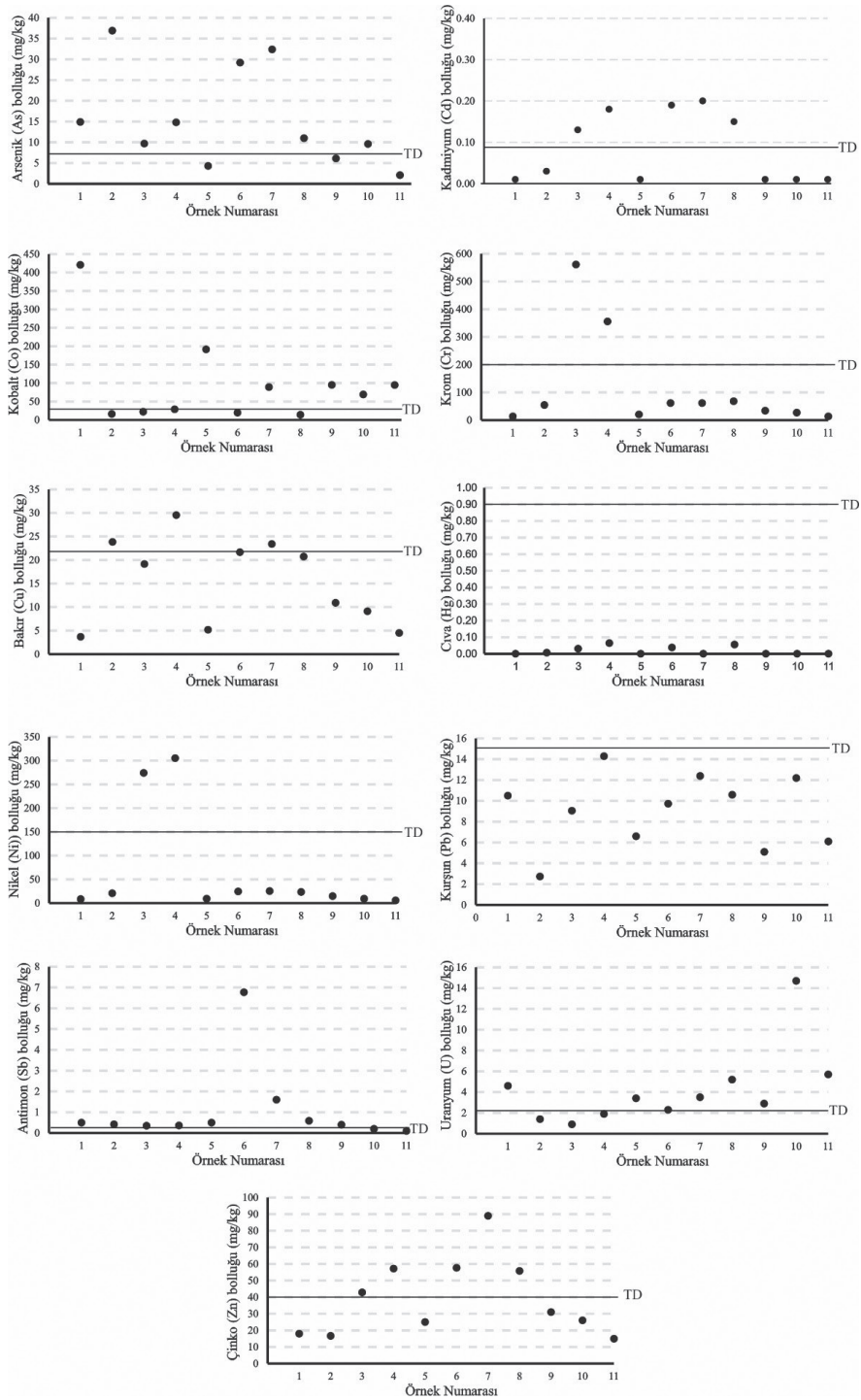
Çalışma alanının örnekleme noktaları işaretlenmiş uydu görüntüsü ve jeoloji haritası Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. T3 ve T4 örnekleme noktaları BMN suları ile etkileşim halindeyken, T2 örneği Azap Gölü'nü temsil etmektedir. Diğer tüm topraklar yakınında yer alan kuyudan çekim yapılan yeraltı suyu ile sulanmaktadır. Örneklerin temel değerler ile kıyaslanmış kimyasal analiz sonuçları Şekil 3'de, zenginleşme faktörü sonuçları Çizelge 8'de listelenmiştir. Toprakların çoğunda

As kirlenmesi tespit edilmiştir. T1 ve T3 topraklarında düşük kirlenme, T4, T6 ve T7 topraklarında kısmen kirlenme, T2 toprağında ise önemli ölçüde kirlenme belirlenmiştir. Gnays birimiyle etkileşimde olan topraklar, jeojenik girdi nedenli arsenik kirlenmesi gelişen bölgeler olarak yorumlanmıştır.

Co kirliliği, T1 ve T5 topraklarında önemli ölçüde gelişmiş olup T7, T9, T10 ve T11 topraklarında kısmen kirlenme düzeyindedir. T1 toprağının sulandığı S1 örneği ve T10 ile T11 topraklarının sulandığı S12 kaynağı, eşik değer üzerinde Co tespit edilen yeraltı sularıdır. Diğer sulara Co değerleri $1 \mu\text{g/L}$ 'den düşük olarak analiz edilmişken, bu sulara sırasıyla 5.6 ve 5.7 $\mu\text{g/L}$ Co analiz edilmiştir. Bölgedeki mermer ve karbonatlardan alınan örneklerde 3.2 mg/L ile 9.9 mg/L arasında Co bulunmakta iken gnays biriminde 136.2 mg/L seviyesinde Co analiz edilmiştir (Küçüksümbül vd., 2022). Bölgede yoğun olarak görülen Co zenginleşmesi, jeojenik girdiye bağlı olarak yorumlanmıştır.

Cr ve Ni zenginleşmesi yalnızca BMN ile sulanan topraklarda belirlenmiştir. Bu durum Cr ve Ni kirlenmesinin, BMN etkisiyle geliştiğini göstermektedir. Sb zenginleşmesi T6 toprağında fazlasıyla kirlenme, T7 toprağında önemli ölçüde kirlenme düzeyindedir. As ile birlikte Sb zenginleşmesi iki yarı metalin bir arada birikimi ile açıklanabileceken, bölgede As kirliliği görülen topraklarda Sb zenginliği T6 ve T7 toprakları hariç doğal süreç düzeyindedir. T6 ve T7 topraklarında antropojenik girdiden söz edilebilir. Zn ve Cd kirliliği aynı topraklarda ve yakın seviyelerde olup tarımsal etkinlikten kaynaklanan antropojenik girdi olarak değerlendirilmiştir.

Küçüksümbül, Tarcan



Şekil 3. Tarım topraklarının temel değer (TD) işaretli kimyasal analiz sonuçları.

Figure 3. Chemical analysis results of agricultural soils with the background value (TD) marked.

U kirliliği T5, T7 ve T8 topraklarında düşük, T1 ve T11 topraklarında kısmen, T10 toprağında ise önemli ölçüde kirlilik seviyesindedir. Yüksek düzeyde U analiz edilen yeraltı suları S7 ve S12 sırasıyla T8 ve T10 toprakları ile etkileşim halindedir. Jeojenik kaynaklı gelişen kirlenme, alüvyon ile dokanağı olan bölgelerdeki yeraltı suyu ve toprakta artış göstermektedir. Cu, Hg ve Pb için herhangi kirlenme söz konusu değildir. Çalışma alanında doğal seviyesindedir ve herhangi antropojenik ya da jeojenik girdi söz konusu değildir.

dolayı yüksek çıkmış olması olasıdır. Yutma ve deriyle temas yoluyla Co alımı nedeniyle T3 ve T4 toprakları risklidir. İki toprakta BMN ile etkileşimdedir. As için kanserojen risk barındıran topraklar büyükten küçüğe T2, T7, T6, T1 ve T4 olarak sıralanmaktadır. T2 örneği Azap Gölü'nü temsil etmektedir, yakınlarda yerleşim bulunmamaktadır. T7 toprağı Sayrakçı, T6 toprağı Nalbantlar, T1 toprağı Yeşilköy, T4 toprağı ise Özbaşı yerleşkelerini temsil etmektedir. Yerleşke yakınındaki tarım topraklarında As için kanserojen olan toplam sağlık riski T7,

Çizelge 8. Tarım topraklarının zenginleşme faktörü sonuçları (Jeojenik ve/veya antropojenik girdi olması muhtemel olan topraklar koyu yazılmıştır).

Table 8. Results of the enrichment factor of agricultural soils (Soils that are likely to be geogenic and/or anthropogenic inputs were marked in bold).

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	U	Zn
T1	1.86	*	15.15	0.06	0.16	*	0.05	0.66	1.34	2.05	0.42
T2	6.04	0.31	0.77	0.34	1.33	0.10	0.17	0.22	1.47	0.82	0.51
T3	1.60	1.34	1.06	3.47	1.08	0.43	2.26	0.75	1.24	0.53	1.33
T4	2.16	1.64	1.21	1.95	1.47	0.79	2.23	1.04	1.12	0.99	1.56
T5	0.62	*	7.98	0.11	0.26	*	0.07	0.48	1.55	1.75	0.68
T6	4.26	1.73	0.83	0.34	1.08	0.46	0.18	0.71	21.19	1.20	1.58
T7	4.70	1.81	3.74	0.33	1.16	*	0.18	0.90	4.97	1.81	2.42
T8	1.09	0.93	0.40	0.25	0.70	0.46	0.12	0.53	1.25	1.84	1.04
T9	0.68	*	3.08	0.14	0.42	*	0.08	0.29	0.96	1.16	0.65
T10	1.20	*	2.49	0.13	0.39	*	0.06	0.76	0.53	6.55	0.61
T11	0.27	*	3.51	0.07	0.20	*	0.04	0.39	0.28	2.62	0.36

*: Analiz limiti altında kaldığı için hesaplanamamıştır. Herhangi antropojenik ya da jeojenik girdi olmadığı kabul edilebilir.

Maruz kalma biçimine göre (yutma, soluma, deriyle temas) toprakların kanserojen olan/olmayan toplam sağlık riskleri; en yüksek, ortalama ve en düşük değerleriyle birlikte Çizelge 9'da listelenmiştir. Kanserojen olmayan ancak risk barındıran kirlilik parametreleri Co ve Cr olarak belirlenmiştir. Co ve Cr için yutma yoluyla meydana gelebilecek kanserojen olmayan sağlık riski en yüksek topraklar sırasıyla T1 ve T3'tür. Cr için tüm çözülmüş maddenin Cr (VI) olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımdan

T6, T1 ve T4 için sırasıyla 2.38E-04, 2.14E-04, 1.21E-04 ve 1.09E-04 olarak hesaplanmıştır. Diğer topraklar ve analiz edilen elementler için kanserojen olan ya da olmayan sağlık riski söz konusu değildir (Çizelge 9). Kimyasal analizlerde ortalama ölçüm hatasının yüzde 10 olma durumu göz önünde bulundurularak her toprak ve elementin kanserojen olan/olmayan toplam sağlık riskleri tekrar hesaplanmıştır. Ölçüm hatasının göz ardı edildiği sonuçlar ile karşılaştırıldığında ise zararlı olarak kabul edilen

Küçüksümbül, Tarcan

toplam kanserojen sağlık riski için 10^{-4} ve toplam aşan farklı bir toprak örneği tespit edilmemiştir. kanserojen olmayan sağlık riski için 1 değerini

Çizelge 9. Toprağa maruz kalma biçimine göre (yutma, soluma, deriyle temas) elementlerin kanserojen olmayan ve toplam kanser riskleri (En yüksek, ortalama ve en düşük değerler verilmiştir. Sınır değeri aşanlar koyu yazılmıştır).

Table 9. Non-carcinogenic risks of the elements by way of exposure to the soil (ingestion, inhalation and dermal) and total cancer risk (The highest, average and lowest values are given. Those exceeding the limit values are marked in bold).

	RK _{oral}		RK _{soluna}		RK _{deri}		Kanser Riski	
	Çocuk	Yetişkin	Çocuk	Yetişkin	Çocuk	Yetişkin	Çocuk	Yetişkin
As	5.90E-01	3.37E-01	6.59E-04	4.96E-04	3.14E-02	5.76E-02	2.71E-04	1.78E-04
	2.48E-01	1.42E-01	2.78E-04	2.09E-04	7.35E-03	2.43E-02	1.15E-04	7.48E-05
	3.36E-02	1.92E-02	3.75E-05	2.82E-05	6.65E-04	3.28E-03	1.54E-05	1.01E-05
Cd	3.84E-03	5.48E-04	5.36E-06	4.03E-06	1.52E-03	7.50E-03	3.38E-10	2.54E-10
	*	*	*	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*	*	*	*
Co	1.35E+01	1.92E+00	1.88E-02	1.41E-02	8.88E-01	6.57E-01	**	**
	3.09E+00	4.41E-01	4.31E-03	3.24E-03	2.04E-01	1.51E-01	**	**
	4.47E-01	6.39E-02	6.25E-04	4.70E-04	2.95E-02	2.19E-02	**	**
Cr	1.79E+00	2.56E-01	1.50E-03	1.13E-03	4.74E+00	3.51E+00	9.79E-03	5.64E-03
	3.70E-01	5.28E-02	3.10E-04	2.33E-04	9.76E-01	7.23E-01	2.02E-03	1.16E-03
	4.37E-02	6.25E-03	3.67E-05	2.76E-05	1.15E-01	8.55E-02	2.39E-04	1.38E-04
Cu	9.45E-02	1.35E-02	**	**	4.68E-04	3.46E-04	**	**
	4.89E-02	6.99E-03	**	**	2.47E-04	1.83E-04	**	**
	8.87E-04	1.27E-04	**	**	5.85E-05	4.33E-05	**	**
Hg	3.90E-03	5.57E-04	5.81E-08	4.36E-08	2.57E-04	1.90E-04	**	**
	*	*	*	*	*	*	**	**
	*	*	*	*	*	*	**	**
Ni	1.46E-01	2.09E-02	9.09E-04	6.84E-04	2.42E-01	1.79E-01	6.87E-07	5.17E-07
	3.15E-02	4.49E-03	1.95E-04	1.47E-04	5.19E-02	3.84E-02	1.48E-07	1.11E-07
	2.73E-03	3.90E-04	1.70E-05	1.28E-05	4.51E-03	3.34E-03	1.28E-08	9.65E-09
Pb	3.92E-02	5.59E-03	**	**	2.58E-03	1.91E-03	1.24E-06	2.23E-07
	2.55E-02	3.65E-03	**	**	1.69E-03	1.25E-03	7.84E-07	1.39E-07
	7.48E-03	1.07E-03	**	**	4.94E-04	3.65E-04	2.37E-07	4.27E-08
Sb	1.62E-01	2.32E-02	6.05E-06	3.41E-05	7.14E-02	5.29E-02	**	**
	2.57E-02	3.67E-03	9.57E-07	5.40E-06	1.13E-02	8.37E-03	**	**
	2.40E-03	3.42E-04	8.93E-08	5.04E-07	1.05E-03	7.81E-04	**	**
U	7.05E-01	1.01E-01	9.85E-05	7.40E-05	4.65E-02	3.44E-02	**	**
	2.03E-01	2.90E-02	2.83E-05	2.13E-05	1.34E-02	9.90E-03	**	**
	4.32E-02	6.16E-03	6.03E-06	4.53E-06	2.85E-03	2.11E-03	**	**
Zn	2.84E-03	4.06E-04	**	**	1.88E-04	1.39E-04	**	**
	1.26E-03	1.80E-04	**	**	8.33E-05	6.17E-05	**	**
	4.79E-04	6.85E-05	**	**	3.16E-05	2.34E-05	**	**

*: Bazı topraklardaki analiz sonuçları tayin limiti altında kaldığı için hesaplanamamıştır.

** : Referans konsantrasyon (RfC_i) değeri veya eğim faktörü (SF) önerilmediği için hesaplanamamıştır.

Su Kirliliği

Çalışma alanındaki yeraltı suları 225 ile 1268 $\mu\text{S}/\text{cm}$ arasında elektriksel iletkenlik ve 6.31 ile 8.17 arasında değişen pH değerlerine sahiptir. Örneklenen suların kullanım amaçları, kuyuların derinliği, bazı fiziksel parametreler ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. Avrupa Birliği (EU, 2014) ve Türk Standartlarında (TS, 2013) uranyum için herhangi eşik değer belirlenmediği için Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2017) ve Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US EPA, 2018) tarafından uygun görülen 30 $\mu\text{g}/\text{L}$ değeri kullanılmıştır. S2 ve S8 hariç tüm kaynak ve kuyu suları içme amaçlı tüketilmektedir. Suların kanserojen olan ve olmayan riskleri sadece yetişkinler için hesaplanmıştır. İçme amaçlı tüketilen sularda limit değerın üzerinde analiz edilen kirlilik parametreleri As ve U olarak öne çıkmaktadır.

Arsenik sağlık riski büyükten küçüğe sırayla S13, S11, S2, S5 ve S1 sularında belirlenmiştir. İçme amaçlı tüketilmemesi karşın, Büyük Menderes Nehri suları As açısından toplam kanserojen riski en yüksek örneklemedir. Limit değerin 6 katından fazla arsenik içeren S11 kuyusu, Kisir bölgesinde içme amaçlı tüketilen onlarca kuyudan birisidir. Hemen hemen aynı derinlikte ve birbirine çok yakın noktalarda açılan kuyuları temsil eden örnekleme, yüksek kanserojen riski nedeniyle dikkat çekmektedir. (Çizelge 10). Sadece sudaki arsenikten kaynaklı

bölge halkında 500 kişiden 1’inin kanser olması beklenir. Bu oran tolere edilebilecek değerin yaklaşık 20 katına karşılık gelmektedir. Karacahayıt bölgesinde yüzeye yakın kuyu sularında (S6) arsenik riski bulunmazken gnays birimine yakın ve 10 metreden yüksek sondajlar (S5) arsenik açısından risk barındırmaktadır. Yine Azap Gölü yüzey suyu örneği ve Yeşilköy kuyu suları sınır değerin üzerinde arsenik içermektedir.

Uranyum kirliliği büyükten küçüğe sırasıyla S5, S8 ve S12 sularında belirlenmiştir. S12 kaynağı gnays ile dokanağı olan bölgenin yakınında yaklaşık 1 L/sn debiyle yüzeylenmektedir. Diğer sular ise 40 ve 45 metre derinliğindeki kuyulardan üretilmektedir. S5 ve S8 sırasıyla Karacahayıt ve Sayrakçı bölgelerini temsil etmektedir. S5 kuyu suyu limit değerin 3 katı kadar uranyum bulundurmaktadır. Bölgede kuyuların derinliği arttıkça suda çözülmüş uranyum miktarı artış göstermektedir. Söke Ovası alüvyon akiferlerinde uranyum taşınımının, potasyum ve mangan zenginleşmesiyle birlikte geliştiği belirlenmiştir (Küçüksümbül, 2018). Benzer durum çalışma alanında da geçerlidir. En yüksek çözülmüş uranyum belirlenen S5 örneği aynı zamanda en yüksek çözülmüş potasyum değerine sahiptir. Alüvyondaki örneklemelemlerin (S1, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11) K-U bolluk bağıntısı 0.7 olarak hesaplanmıştır. İyonların bolluğu arasındaki bağıntı, kuvvetli olarak tanımlanabilir.

Küçüksümbül, Tarcan

Çizelge 10. Suların kanserojen ve kanserojen olmayan risk sonuçları (Tolere edilebilir değeri aşanlar koyu yazılmıştır).

Table 10. Results of cancer and non-carcinogenic risk of waters (Values with higher than tolerable marked in bold).

Kod	Kanserojen Olmayan Toplam Risk										Kanserojen Toplam Risk		
	As	B	Ba	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	U	Zn	As	Cr	Pb
S1	1.74	*	0.003	*	*	*	0.013	0.02	0.32	*	7.84E-04	**	6.54E-07
S2 ^(a)	2.09	0.02	0.005	0.004	0.005	0.002	0.004	0.01	0.36	0.009	9.40E-04	6.79E-06	4.23E-07
S3 ^(b)	0.05	0.01	0.004	*	0.003	0.001	0.017	0.01	0.97	0.000	2.04E-05	4.52E-06	4.04E-07
S4 ^(b)	0.23	0.01	0.007	*	0.005	0.004	0.003	0.02	0.07	0.003	1.05E-04	6.79E-06	5.00E-07
S5	1.82	0.02	0.014	0.009	0.007	0.004	0.007	0.02	10.2	0.006	8.18E-04	1.02E-05	5.00E-07
S6	*	*	0.002	*	0.035	*	*	0.01	0.01	*	**	5.20E-05	3.08E-07
S7	0.48	0.01	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.01	1.36	0.001	2.14E-04	4.52E-06	4.23E-07
S8	*	*	0.010	*	*	*	*	0.02	4.07	*	**	**	4.81E-07
S9	0.11	0.004	0.008	0.004	0.004	0.004	0.002	0.01	2.64	0.007	5.09E-05	5.66E-06	4.23E-07
S10	*	*	0.003	*	0.039	*	*	0.03	0.41	*	**	5.88E-05	1.02E-06
S11	4.61	0.00	0.001	0.003	0.001	0.001	0.003	0.01	1.62	0.001	2.07E-03	2.15E-06	4.04E-07
S12	*	*	0.002	*	*	*	0.006	0.01	4.07	*	**	**	3.08E-07
S13	7.02	0.36	0.233	0.01	0.06	0.03	0.04	0.25	0.72	0.015	3.16E-03	9.50E-05	7.48E-06

^(a): Küçüksümbül vd. 2020,^(b): Küçüksümbül vd. 2022,

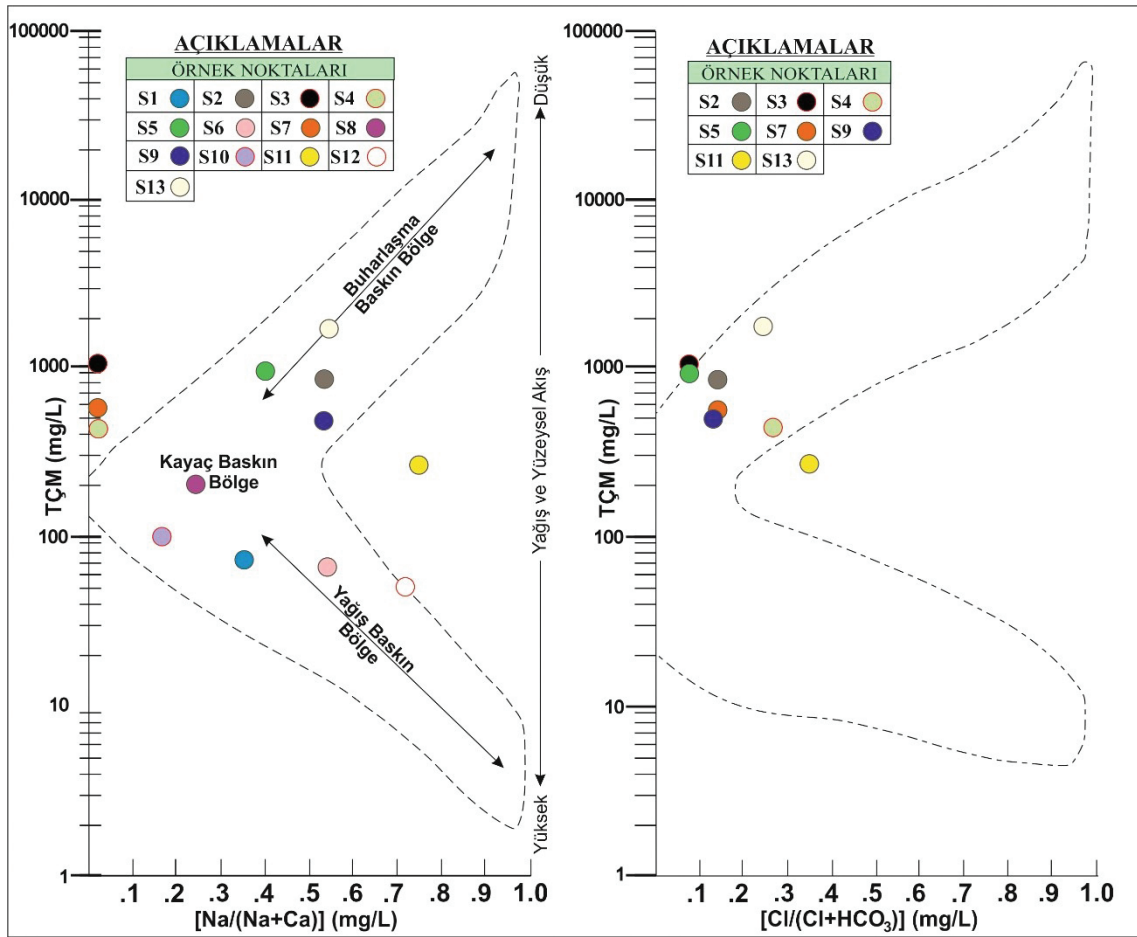
*: Cihazın algılama limiti altında kalan sonuçları ifade etmektedir. İlgili laboratuvar tarafından arsenik 1 µg/L, bor 30 µg/L, kadmiyum 0.03 µg/L, krom 1 µg/L, bakır 0.5 µg/L, çinko 30 µg/L olarak rapor edilmiştir.

**: Analiz limiti altında kalan değerler nedeniyle hesaplanamamıştır, suların ilgili element nedeniyle herhangi bir sağlık riski barındırmadığını ifade eder.

Çalışma alanının hidrojeokimyasal süreçleri ve mekanizmaları belirlemek için majör iyon veri seti yorumlanmıştır. S2 Azap Gölü suyu için baskın katyon Mg iken, yeraltı sularının çoğunda (S3, S4, S6, S7, S8 ve S10) baskın katyon Ca olarak belirlenmiştir. S1 suyu için Ca-Na-Mg, S5 suyu için Ca-Mg-Na, S9 için Mg-Ca-Na olarak belirlenmiştir. Arsenik kirliliğinin en yüksek olduğu Kisir bölgesini temsil eden kuyu suyu (S11) ve uranyum kirliliğinin en yüksek olduğu S12 kaynağında ise sırasıyla baskın katyon Na-Mg ve Na-Ca olarak belirlenmiştir. S13 nehir suyunda ise baskın katyon Mg olarak bulunmuştur. Anyon analizi sorunsuzca tamamlanan (S1, S6, S8, S10 ve S12 harici) suların çoğunda (S3, S5, S7 ve S9) baskın anyon HCO₃ olarak belirlenmiştir. Baskın anyonlar; S2 suyu için HCO₃-Cl, S4 suyu için HCO₃-SO₄-Cl,

S11 suyu için HCO₃-Cl olarak belirlenmiştir. S13 nehir suyu ise SO₄ + HCO₃ olarak bulunmuştur. Gibbs diyagramına göre suların S3, S4, S7, S8, S10 kayaç baskın bölge civarında ve S1, S2, S5, S6, S9, S12 ve S13 ise buharlaşma etkisinin düşük ve orta düzeyde olduğu bölgede yer almaktadır (Şekil 4). Azap Gölü (S2) ve Büyük Menderes Nehri (S13) için buharlaşma etkisinden kaynaklı Na⁺ ve Cl⁻ zenginleşmesi beklenir.

Bölgede, arsenik ve uranyum tehlikesi gösteren suların bu iki kirlilik parametresi arasında herhangi bir bağlantı belirlenmemiştir. Arsenik kirliliği gnays biriminden kaynaklı olarak gerçekleşmektedir. Uranyum zenginleşmesi ise muhtemelen kuvars damarlarında meydana gelmektedir. İçme amaçlı tüketilen suların insan sağlığını olumsuz etkileyecek niteliğe dönüşmesinde jeojenik girdiler etkilidir.



Şekil 4. Suların Gibbs (1970) diyagramında gösterimi.

Figure 4. Waters plotted in Gibbs (1970) diagram.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Gnays biriminden kaynaklanan jeojenik girdi olarak yorumlanan topraktaki As kirlenmesi, özellikle Sayrakçı ve Nalbantlar bölge halkında kanser riski oluşturmaktadır. As nedeniyle kanserojen risk barındıran topraklar büyükten küçüğe T2, T7, T6, T1 ve T4 olarak sıralanmaktadır (Çizelge 9). Tarım topraklarında en yüksek kanser riski arsenik için 2.38E-04 olarak Sayrakçı bölgesinde belirlenmiştir. Sb zenginleşmesi bazı topraklarda çok yüksek düzeydedir. As ile birlikte Sb zenginleşmesi

iki yarı metalin bir arada birikimi ile açıklanabilecekken, bölgede As kirliliği görülen topraklarda Sb zenginliği T6 ve T7 toprakları hariç doğal süreç düzeyindedir. T6 ve T7 topraklarında Sb için antropojenik girdiden söz edilebilir. Cu, Hg ve Pb için herhangi kirlenme söz konusu değildir. Bölge topraklarında yoğun olarak görülen Co zenginleşmesi, jeojenik girdiye bağlı olarak gelişmiş olarak yorumlanmıştır. Cr ve Ni zenginleşmesinin nehirle sulanan topraklarda belirlenmesi, Cr ve Ni kirlenmesinin BMN etkisiyle geliştiğini göstermektedir. Zn ve Cd

kirliliği aynı topraklarda ve yakın seviyelerdedir. Tarımsal etkinlikten kaynaklı antropojenik girdi olarak değerlendirilmiştir. U kirliliği T5, T7 ve T8 topraklarında düşük, T1 ve T11 topraklarında kısmen, T10 toprağında ise önemli ölçüde kirlilik seviyesindedir.

Yüksek düzeyde U analiz edilen yeraltı suları S7 ve S12 sırasıyla T8 ve T10 toprakları ile etkileşim halindedir. Jeojenik kaynaklı gelişen uranyum kirlenmesi, yeraltı suyu ve toprakta bolluğa neden olmaktadır. En yüksek uranyum düzeyinin gözlemlendiği örneklemeler ise yüksek kotlarda gnays ile şist dokanağında hem kaynak suyunda hem de toprakta analiz edilmiştir. Karacahayıt bölgesi kuyu sularında Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından önerilen limit değerinin 3 katı, Sayrakçı bölgesi kuyu sularında ise limit değerinin üzerinde uranyum kirliliği tespit edilmiştir. Kuyu derinliği arttıkça sularında uranyum bolluğu artış göstermektedir. Derin dolaşımda olmayan ve düşük elektriksel iletkenliğe sahip S12 kaynağındaki yüksek uranyum, civarda uranyumca zenginleşme gösteren kayaçların olduğunu işaret etmektedir. Bölgenin uranyum potansiyeli ve jeolojisinin detaylı araştırılması gerekmektedir. Yeraltı sularında en yüksek kanser riski arsenik için $2.07E-03$ olarak Kısır bölgesinde belirlenmiştir. Büyük Menderes Nehir suyu içme amaçlı tüketimde en yüksek kanser riski barındıran örneklemedir. Nehir suları yakınında içme amaçlı kuyu açılmaması önerilir. Türk Standartlarında uranyum için herhangi bir limit değeri belirlenmemiş olup ilgili mevzuatın güncellenmesi önerilir. Bölgede açılan ya da açılması planlanan kuyuların kayıt altına alınması, sulara uranyum ve arsenik için kimyasal analizler yapıldıktan sonra kullanım izni verilmesi gerekmektedir. Sayrakçı ve Kısır bölgeleri başta olmak üzere, Karacahayıt ve Nalbantlar bölgesinde kanser vakası görülme sıklığının araştırılması ve sağlık önlemlerinin alınması önerilir.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi 2017.KB.FEN.014 numaralı projeden sağlanan ödenek yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yazarlar; Hacettepe Üniversitesi Hidrojeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Serdar BAYARI ve Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nden Ünsal GEMİCİ'ye bilimsel değerlendirmelerinden, dergi hakemlerine makaleye önemli katkılarından ötürü teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akinci, G., Gök, G., Bilgin, M., 2019. Heavy metals bioconcentration and translocation in plants: the influence of a thermal power site. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(8), 1625-1637.
- Bourennane, H., Douay, F., Sterckeman, T., Villanneau, E., Ciesielski, H., King, D., Baize, D., 2010. Mapping of anthropogenic trace elements inputs in agricultural topsoil from Northern France using enrichment factors. *Geoderma*, 157(3-4), 165-174.
- CSQG (Çevre ve İnsan Sağlığının Korunması için Kanada Toprak Kalitesi Yönergeleri), 2010. Tarımsal toprak kalitesi sınır değerleri kılavuzu. <http://st-ts.ccm.ca/en/index.html> (14.02.2021).
- Çevik, F., Göksu, M. Z. L., Derici, O. B., Fındık, Ö., 2009. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 152(1), 309-317.
- EU (Avrupa Birliği), 2014. Drinking Water Regulations, S.I. No. 122 of 2014.
- FAO (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü), 2007. Çevre Yönetimi (Toprak Kalitesi Standartları) Düzenlemeleri. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/tan151538.pdf> (14.02.2021).

- Ferreira-Baptista, L., De Miguel, E., 2005. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. *Atmospheric environment*, 39(25), 4501-4512.
- Gibbs, R. J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170 (3962), 1088-1090.
- Goldschmidt, V. M., 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller Lecture, delivered before the Chemical Society on March 17th, 1937. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 655-673.
- Güney, A., Akgül, E., 2019. Aydın'da Madencilik: Potansiyeli ve Değerlendirilmesi. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara, 277.
- Kazancı, N., Gürbüz, A., Boyraz, S., 2011. Geology and evolution of the river Büyük Menderes, western Anatolia, Turkey. *Geol. Bull. Turkey*, 54, 25-56.
- Küçüksümbül, A., 2018. Söke Ovası ve Bafa Gölü çevresinin hidrojeolojik incelenmesi: Jeotermal Potansiyeli, Toprak ve Su Kirliliği. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi.
- Küçüksümbül, A., Akar A. T., Tarcan, G., 2020. Bafa Gölü'nün hidrokimyasal ve hidrojeolojik incelenmesi: sürdürülebilir su kaynak yönetimi. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 44(2), 197-224. doi.org/10.24232/jmd.826954.
- Küçüksümbül, A., Akar A. T., Tarcan, G., 2022. Source, degree and potential health risk of metal(loid)s contamination on the water and soil in the Söke Basin, Western Anatolia, Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 6. doi.org/10.1007/s10661-021-09670-2.
- Lim, H. S., Lee, J. S., Chon, H. T., Sager, M., 2008. Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, 96(2-3), 223-230.
- Luo, X. S., Ding, J., Xu, B., Wang, Y. J., Li, H. B., Yu, S., 2021. Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils. *Science of the Total Environment*, 424, 88-96.
- McLennan, S. M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(4).
- MEF (Finlandiya Çevre Bakanlığı), 2007. Toprak Kirliliği ve İyileştirme İhtiyaçlarının Değerlendirilmesine Dair Hükümet Kararı. <https://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2007/en20070214.pdf> (14.02.2021).
- MTA (Maden Tektik ve Arama Genel Müdürlüğü), 2002. 1:500000 Ölçekli Aydın, Denizli, Muğla Bölgesi Jeoloji Haritası. Ankara. Türkiye.
- Öztunalı, Ö., 1965. Demirtepe-Çavdar, Osmankuyu-Kisir (Çine Masifi) Uranyum Zuhurlarının Petrografileri ve Oluşumları. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*.
- Peña-Fernández, A., González-Muñoz, M. J., Lobo-Bedmar, M. C., 2014. Establishing the importance of human health risk assessment for metals and metalloids in urban environments. *Environment International*, 72, 176-185.
- Prasad, S., Saluja, R., Joshi, V., Garg, J. K., 2020. Heavy metal pollution in surface water of the Upper Ganga River, India: human health risk assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(11), 1-15.
- RAIS (Risk Değerlendirme Bilgi Sistemi), 2021a. <https://rais.ornl.gov/tutorials/toxvals.html#1> (14.02.2021).
- RAIS (Risk Değerlendirme Bilgi Sistemi), 2021b. https://rais.ornl.gov/cgi-bin/tools/TOX_search?select=chemtox (14.02.2021).
- Rudnick, R. L., Gao, S., Holland, H. D., Turekian, K. K., 2003. Composition of the continental crust. *The Crust*, 3, 1-64.
- Saha, N., Rahman, M. S., Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., 2017. Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk. *Journal of Environmental Management*, 185, 70-78.

- Sakan, S., Popović, A., Anđelković, I., Đorđević, D., 2016. Aquatic sediments pollution estimate using the metal fractionation, secondary phase enrichment factor calculation, and used statistical methods. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(3), 855-867.
- Shil, S., Singh, U. K., 2019. Health risk assessment and spatial variations of dissolved heavy metals and metalloids in a tropical river basin system. *Ecological Indicators*, 106, 105455.
- Sutherland, R. A., 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39(6), 611-627.
- TS (Türk Standardları). (2010.08.06). Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik. Resmi Gazete (27605). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100608-3.htm> (14.02.2021).
- TS (Türk Standardları). (2013.03.07). İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete (28580). <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/03/20130307-7.htm> (14.02.2021).
- Turekian, K. K., Wedepohl, K. H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2), 175-192.
- US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı), 1992. Definitions and General Principles for Exposure Assessment. Guidelines for exposure assessment. Washington, DC, USA: Office of Pesticide Programs.
- US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı), 1999. Guidance for Performing Aggregate Exposure and Risk Assessments. Washington, DC, USA: Office of Pesticide Programs.
- US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı), 2004. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: Human health evaluation manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment). EPA/540/R/99/005. Washington, DC.
- US EPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı), 2018. Drinking Water Standards and Health Advisories Tables. Washington, DC, USA: Office of Water.
- US EPA IRIS (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'nın Entegre Risk Bilgi Sistemi), 2021. https://cfpub.epa.gov/ncea/iris_drafts/atoz.cfm (14.02.2021).
- Wedepohl, K. H., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217-1232.
- WHO (Dünya Sağlık Örgütü), 2017. Guidelines for drinking-water quality. Geneva, Schweiz. 1-542.
- Wongsasuluk, P., Chotpanarat, S., Siritwong, W., Robson, M., 2014. Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water from shallow groundwater wells in an agricultural area in Ubon Ratchathani province, Thailand. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(1), 169-182.
- Zhang, J., & Liu, C. L., 2002. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China—weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54(6), 1051-1070.
- Zhao, D., Wan, S., Yu, Z., Huang, J., 2015. Distribution, enrichment and sources of heavy metals in surface sediments of Hainan Island rivers, China. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 5097-5110.