

YOĞUN TARIMSAL ETKİ ALTINDAKİ HARRAN OVASI TOPRAKLARINDA AĞIR METAL DÜZEYLERİNİN ARAŞTIRILMASI; MULTİ-İSTATİSTİKSEL YAKLAŞIM

Hatice KARA * 

Alınma: 10.04.2025; düzeltme: 20.05.2025; kabul: 27.05.2025

Öz: Toprak kirliliği giderek çok önemli bir çevresel sorun haline gelmiştir. Bu çalışmada, uzun yıllardır yoğun tarım yapılan Harran Ovasında, Mayıs – 2020 ve Ekim – 2020 dönemlerinde 26 adet drenaj kanalının etrafındaki toprakların ağır metal analizleri yapılmış ve bu elementlerin olası kaynakları, kirlilik durumu Multi – istatistiksel tekniklerle değerlendirilmiştir. Veriler, ulusal (TKKY) ve uluslararası (WHO) mevzuata göre değerlendirilmiştir. Mevzuat değerlendirmesine göre Al, Ba, Be, Cd, Co, Cu, Li, Mn, Mo, Pb, V ve Zn parametrelerinde TKKY ve WHO’a göre sınır değeri aşımına rastlanmamıştır. Ancak Cr parametresinde örneklerin % 1,92’sinde, Fe parametresinde % 76,92’sinde, Ni parametresinde ise örneklerin % 80,77’sinde sınır değerler aşılmıştır. One way ANOVA analizi ile örnekleme noktaları arasında Al, Cd, Cr, Fe, Li, Mn, Mo ve V elementleri farklılık gösterirken, örnekleme dönemleri açısından Ba, Be, Fe, Li, Ni, Pb ve Zn anlamlı düzeyde farklılık göstermiştir. Faktör analizi (FA) sonucunda, üç temel bileşen toplam varyansın % 78,89’unu açıklamıştır. Birinci faktör (F1), toplam varyansın % 46,52’sini, ikinci faktör (F2) % 66,46’sını, üçüncü faktör (F3) ise % 78,89’unu açıklamıştır. Veriler değerlendirildiğinde; ağır metal, pestisit vb. kirlilik yüküne sahip drenaj suları ile etkileşimde olan veya sulanan toprakların bu kirlilik yükünden etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toprak, Drenaj kanalı, Ağır metal, Harran Ovası, Multi – istatistik

Investigation of Heavy Metal Levels in the Soils of Harran Plain Under Intense Agricultural Influence; A Multi-Statistical Approach

Abstract: Soil pollution has become an increasingly important environmental problem. In this study, heavy metal analyzes were carried out in the soils around 26 drainage canals in the Harran Plain, where intensive agriculture has been carried out for many years, between May - 2020 and October - 2020, and the possible sources of these elements and the pollution status were evaluated with multi-statistical techniques. The data were evaluated according to national and international legislation. According to the legislation evaluation, no limit value exceedances were found in the parameters Al, Ba, Be, Cd, Co, Cu, Li, Mn, Mo, Pb, V and Zn according to TKKY and WHO. However, the limit values were exceeded in 1.92% of the samples for the Cr parameter, 76.92% for the Fe parameter and 80.77% for the Ni parameter. With one way ANOVA analysis, while Al, Cd, Cr, Fe, Li, Mn, Mo and V elements differed among the sampling points, Ba, Be, Fe, Li, Ni, Pb and Zn showed significant differences in terms of sampling periods. As a result of factor analysis (FA), three principal components explained 78.89% of the total variance. The first factor (F1) explained 46.52% of the total variance, the second factor (F2) explained 66.46% and the third factor (F3) explained 78.89%. When the data were evaluated; it was concluded that the soils that interact with or are irrigated with drainage waters that have pollution loads such as heavy metals, pesticides etc. were affected by this pollution load.

Keywords: Soil, Drainage channel, Heavy metal, Harran Plain, Multi – statistics

* GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, 63040, Şanlıurfa, Türkiye.
İletişim yazarı: Hatice KARA (kimyagerkara@gmail.com)

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu hızlı bir şekilde artmaktadır ve gelişmekte olan ülkelerde bu artış daha fazla olmaktadır. 2050 yılında Dünya nüfusunun 9,7 milyara, Türkiye'nin nüfusunun 100 milyona yaklaşacağı tahmin edilmektedir (TÜİK, 2024). Söz konusu nüfusun besin ihtiyacının karşılanması ise etkili ve verimli tarım yapılmasından geçer. Sulamalı tarım ise, verim ve kalitenin artmasında önemli etkenlerin başında gelir. Dünya genelinde ekili alanların % 20'sinde sulu tarım yapılmakta ve bu alanlardan yaklaşık % 40 ürün elde edilmektedir (De Wrachien ve diğ., 2021). Tarımsal sulama için yılda 2850 km³ su çekimi yüzey ve yer altı su kaynaklarından yapıp, dünyadaki toplam su çekiminin % 70'ine karşılık gelmektedir (Steduto, 2018).

Sulama tarımsal üretimi etkileyen en önemli faktörlerin başında gelir. Son yıllarda, dünyada su sıkıntısı çeken kurak bölgelerin çoğunda, tarımsal sulama suyu ihtiyacının % 70 – 90'ı geri kazanılmış atık sulardan sağlanmaktadır (Megersa ve Abdulahi, 2015). Tarımsal sulamadan geri dönen drenaj suları da sulama suyunun yetersiz olduğu yerlerde tekrar kullanılmaktadır. Nehirler, göller, yeraltı suları gibi tarımsal drenaj suları da gübreler, pestisitler, organik atıklar vb farklı kirlilik kaynaklarının etkisi altındadır. Bu suların içerdiği kirletici miktarı (tuz, ağır metaller, zehirli organik bileşikler, patojenler vb) düşünüldüğünde, içeriğinin detaylı belirlenmesi ve kullanımının kontrollü olması gerektiği çok açıktır. Ağır metallerin yüksek değerleri, drenaj suyunun yeniden kullanımını sınırlandıracak veya suyla karıştırma oranının artırılması gerekecektir. Ancak, suyun güvenli şekilde yeniden kullanımı ve bertarafı için drenaj suyunun özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Drenajlardaki ağır metaller çoğunlukla endüstriyel kaynaklardan üretilir. Drenaj sularının ağır metal kirlilik yükünü azaltmak için iyon değişimi, ters osmoz, solar havuzlar, demirle kimyasal çöktürme, mikroalg – bakteriyel arıtma, biyolojik çökeltme, akışlı sulak alanlar gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler iyi bir arıtım için bilinen en iyi çözümlerdir (Kurniawan ve diğ., 2006; Nasr ve Zahran, 2015; Yadav ve diğ., 2021). Uzun yıllar atık sularla sulama yapılan topraklarda (özellikle drenajı kötü), tuzluluk ve ağır metal birikimi olabileceğinden, toprakların düzenli olarak takip edilip analizlerinin yapılması, topraktaki değişimi gözleyebilme açısından gerekli ve önemlidir (OSIB, 2017; Öztürkmen ve Yarmaç, 2018). Hindistan Delhi'de 20 yıl boyunca kanalizasyon suyu ile sulanan topraklarda ekstrakte edilebilir çinko (Zn), bakır (Cu), demir (Fe), nikel (Ni) ve kurşun (Pb) sırasıyla % 208, % 170, % 170, % 63, % 29 oranında birikmeye neden olduğu saptanmıştır (Rattan ve diğ., 2005; Mapanda ve diğ., 2005). Liu ve diğ.(2005) tarafından, Çin Pekin'de 40 yıl boyunca kanalizasyon sulamasının topraklarda Cd, Cr, Cu, Zn ve Pb birikiminin artmasına neden olduğu belirlenmiştir. Kirliliği su (özellikle tarımsal drenaj suları) ile sulanan topraklarda eser elementler, ağır metaller, toksik bileşikler bitkiler tarafından emilebilir, kök ve yaprak kısımlarında birikebilir. Böylece tüketim yoluyla ağır metaller insan ve diğer canlılara geçebilir (Fu ve Xi, 2020; Mitra ve diğ., 2022).

Ağır metaller, bireyleri ve çevreyi etkileyen büyük yoğunluklu ve yüksek atom kütesine sahip elementlerdir. Ağır metaller biyolojik olarak parçalanamadıkları için düşük konsantrasyonlarda bile tehlikelidir (Baby ve diğ., 2010; Zaynab ve diğ., 2022). Kronik toksisiteleri, biyolojik olarak parçalanmamaları ve çevresel biyolojik birikimleri nedeniyle inanılmaz derecede zararlı çevre kirleticileridir (Mahurpavar, 2015). Hg, As, Ni, Co, Cu, Cd ve Cr gibi ağır metallerin biyoakümülyasyon desenleri, çoğu organizmanın yaşamı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Rahman ve Singh, 2019). Çevrede artan ağır metal toksisitesinin başlıca nedeni antropojenik kaynaklı faaliyetlerdir. Ağır metal kirliliğinin antropojenik nedenleri arasında madencilik faaliyetleri, pestisitler, gübreler ve herbisit kullanımı, endüstriyel ve kanalizasyon suyuyla tarla sulama bulunur (Kara ve diğ., 2023; Nasr ve Zahran, 2015; Zaynab ve diğ., 2022).

Ağır metal kirliliğinin toprak kirliliğine yol açması, toprak kalitesine yönelik en ciddi çevresel tehditlerden biridir. Son yıllarda bu sorun; düşük, yüksek, orta gelirli dünya ülkelerinin çoğunda giderek daha fazla ilgi görmektedir. Küresel ekonomideki son dönemdeki gelişmeler, topraklarda ağır metallerin çeşit ve konsantrasyon olarak artmasına sebep olmuştur (Shifaw, 2018; Sodango

ve diğ., 2018). Tarımsal toprakların kirlenmesi özellikle kimyasal gübrelerin, pestisitlerin, hayvan gübrelerinin, sulama atık sularının, kanalizasyon çamurunun ve katı atıkların yaygın kullanımı nedeniyle artmıştır (Azhar ve diğ., 2022)

Harran Ovası'nda yaklaşık olarak 158 142 ha alan sulanmaktadır (DSİ, 2014). Aşırı sulama, drenaj alt yapısının yetersiz olması, topoğrafik yapı nedeniyle taban suyu seviyesi oldukça yükselmiş ve 8 000 hektar alanda tehlikeli hale gelmiştir (OSIB, 2017). Ovada karık ve tava sulama yöntemleri için tarla içi kültürel faaliyetler çapa-lister çekilmesine ve tavalara oluşturulmasına rağmen, karık ve tavalarda kontrolsüz su uygulamaları yapılmakta ve sulamada en çok uygulanan yöntemin vahşi sulamalar olduğu görülmektedir. Sulama birlikleri ve çiftçiler tarafından iyi bir sulama sistemi ve yönetimi uygulanmadığından alıcı ortam olan drenaj kanallarına boşaltılan yüzeyden gelen akış, oluşan drenajın kütlesi ve hacmi devasa miktarlara ulaşmaktadır. Öyle ki; Temmuz – Ağustos döneminde Arıcan tahliye köprüsünde dönen suların debisi $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 'e ulaşmaktadır. Öte yandan Ovanın mansap kısmında su kısıntısı yaşanmaktadır. Su sıkıntısı çekilen bu kısımlarda tarımsal sulamadan dönen drenaj suları sulamada kullanılmaktadır. Tuz, ağır metal vb toksik bileşenler içeren drenaj suları ile yapılan sulamalar sonucu toprakta ağır metal vb kirleticiler birikmektedir (Karaaslan, 2020; OSIB, 2017).

Bu çalışmada, Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında aşırı sulama ve yanlış tarım uygulamaları nedeniyle yoğun kirletici baskısı altında olan Harran Ovası'nda drenaj kanallarına yakın toprakların ağır metal kirliliği açısından mevcut durumunun belirlenmesi, drenaj kanallarının toprak kirliliği üzerindeki etkisinin araştırılması ve çeşitli istatistiksel tekniklerle kirliliğinin boyutunun ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda ovadan sulama sezonu başında ve sonunda olmak üzere iki dönemde 26 noktadan toprak örnekleri alınmış, örneklerde Al, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn gibi ağır metal parametreleri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler multi – istatistik teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışma, Türkiye'nin en verimli ve önemli ovalarından biri olan Harran Ovası'nda gerçekleştirilmiştir. Harran Ovası, Güneydoğu Anadolu Projesi kapsamında sulamaya açılan, 225.000 ha alanıyla en büyük ovadır ve $36^{\circ}43' - 37^{\circ}08' \text{ K}$ paralelleri, $38^{\circ}57' - 39^{\circ}55' \text{ doğu}$ meridyenleri arasında yer alır. Verimli topraklara ve sulama imkanına sahip olan Harran Ovası'nda tarım ekonomik faaliyetlerin başında gelir. Pamuk, buğday, mısır ovada tarımı yapılan önemli ürünlerdir. Tarımın en önemli gelir kaynağı olduğu ovada, çok fazla gübre ve pestisit kullanılmakta, sulama yapılmaktadır. Zengin bir ekosisteme sahip olan Ova'da çok çeşitli bitki türü bulunmaktadır.

Harran Ovası'nda; kışların soğuk ve yağışlı, yazların sıcak ve kurak olduğu karasal iklim hâkimdir. Yıllık ortalama sıcaklık, buharlaşma ve yağış sırasıyla; 17.2°C , 1.848 mm, 365 mm'dir. Ovada Karaali jeotermal sularının çevresinde seracılık faaliyetleri de yapılmaktadır.

2.2. Çalışma Alanının Jeolojik Özellikleri, Toprak Yapısı ve Drenaj Durumu

Harran Ovası Eosen kalkerleri ile kuşatılmış kuzey – güney yönünde yer alan bir grabendir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde, Miyosen ve sonrasında oluşan şiddetli tektonizmanın son ürünlerinden biri Akçakale grabenidir. Harran Ovası ve çevresindeki en yaşlı kayaç Paleosen olduğu tahmin edilmektedir (DSİ, 1972; Seyrek ve diğ., 2003).

Ova toprakları köken olarak alüvyial ve resüdyal (yerinde oluşmuş) kahverengi ve kırmızı kahverengi topraklardan oluşmaktadır (Öztürkmen ve Yavaş, 2014). Derinlere indikçe fazlaşan

sekonder kireç cepleri ile yüksek kireç oranına sahiptir. Organik madde içeriği düşük, katyon değişim kapasiteleri yüksek olup A, B, C horizonuna sahiptirler. Katyon değişim kapasiteleri kil içeriğine bağlı olarak alt katmanlara doğru artarken, organik madde yüzeyden aşağılara doğru azalmaktadır (Bahçeci ve Bal, 2008; Çullu ve diğ., 2000).

Harran Ovası sulama sistemi 24 saat akış rejimine göre oluşturulmuş açık kanal sistemidir. Şanlıurfa-Harran Ovası Sulaması sulama alanı 147.887 ha' dır. Sulama birlikleri ve çiftçiler tarafından iyi bir sulama sistemi ve yönetimi uygulanmadığından alıcı ortam olan drenaj kanallarına boşaltılan yüzeyden gelen akış, oluşan drenajın kütlesi ve hacmi devasa miktarlara ulaşmaktadır. Öyle ki; Temmuz – Ağustos döneminde Arıcan tahliye köprüsünde dönen suların debisi 60 m³/s'e ulaşmaktadır (Karaaslan, 2020). Öte yandan Ovanın mansap kısmında su kısıntısı yaşanmaktadır. Su sıkıntısı çekilen bu bölgede kalan sulama birlikleri, su kıtlığından dolayı yeraltı suyu (YAS) kuyularından sulama suyu ihtiyaçlarını karşılamaya çalışmaktadırlar. Mansap kısmında kalan çiftçiler ise, sulama sularının yetersiz kaldığı zamanlarda kalitesi düşük olan drenaj sularını sulamada kullanarak; Ovada tuzlanma sorununun hızla artmasına neden olmaktadır (Ağca ve Ergezer, 1995; De Wrachien ve diğ., 2021; OSIB, 2017; TAGEM, 2021).

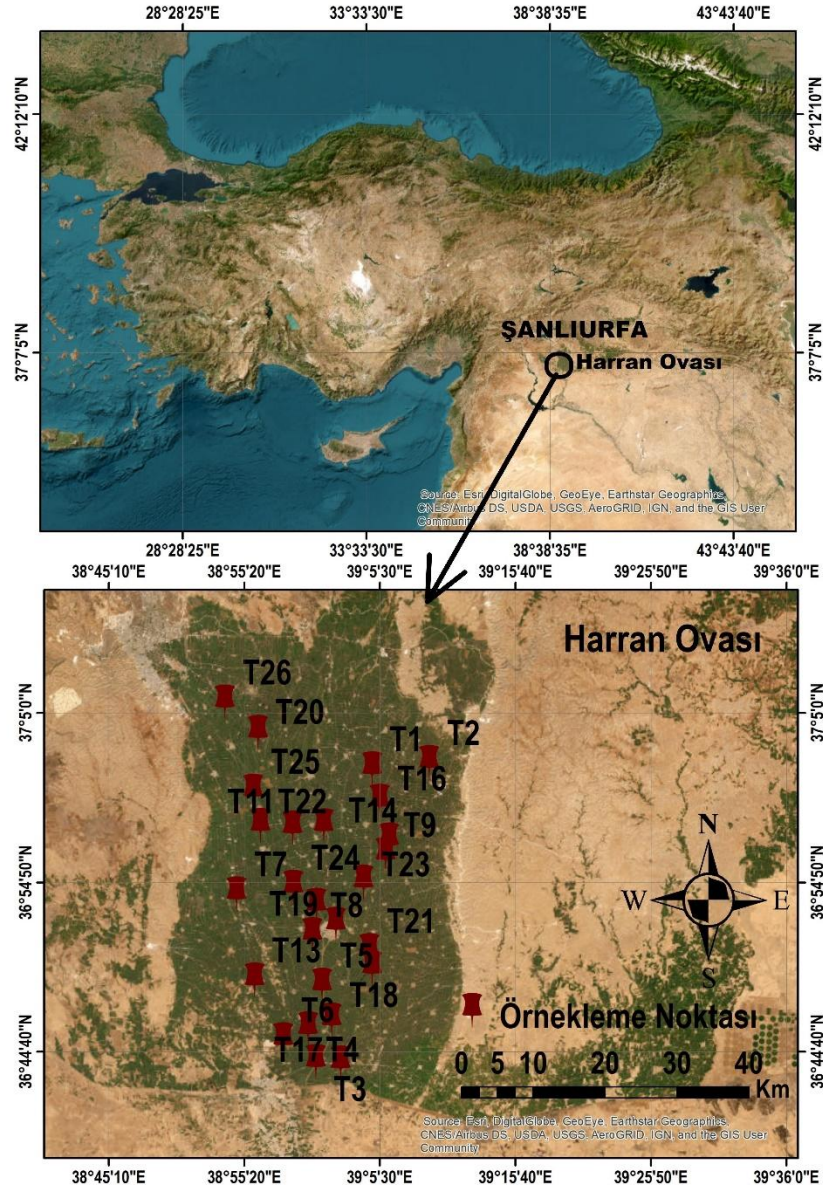
2.3. Örneklerin Toplanması ve Analizi

Bu çalışmada, 26 adet örnekleme noktası bütün Harran Ovası' nı temsil edecek şekilde seçilmiştir. Mayıs 2020 ve Ekim 2020 tarihlerinde yani ovada sulamanın başlangıç ve bitiş dönemlerinde drenaj kanallarına en yakın 26 farklı noktadan toprak numuneleri 0 – 20 cm derinlikten alınmıştır. Örnekleme noktalarının koordinat bilgileri ve lokasyon haritası, Tablo 1 ve Şekil 1' de verilmiştir. Alınan toprak numuneleri etiketlenerek naylon poşetlere konularak laboratuvara getirilmiştir. Daha sonra doğal hava şartlarında kurutulmak üzere hazırlanmıştır. Kurutulan topraklar ilk önce taş, çakıl vb parçacıkların ayrılması için 2 mm elekten elenmiş ve sonrasında iyice öğütülen topraklar 0.5 mm elekten geçirilerek analiz için hazır hale getirilmiştir.

Toprak numunelerinde Al, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, V ve Zn olmak üzere 15 ağır metal analizi yapılmıştır. Söz konusu numunelerin ekstraksiyon işlemi mikro dalga ünitesinde (CEM MARS 6, USA), teflon kaplar ve konsantre HNO₃ ve HCl (1:3) karışımı kullanılarak yapılmıştır. Ekstrakt haline getirilen numuneler seyreltilerek İndüktif Eşleşmiş Plazma ve Optik Emisyon Spektrometresi (ICP – OES) (Perkin Elmer 7000, USA) cihazında okunarak 15 ağır metalin konsantrasyonu belirlenmiştir (Kacar, 2009; Tüzüner, 1990). Kalibrasyon grafiklerini oluşturmak için kullanılan standart (Merck Multi – Element Standard Solution) ve kimyasallar (Merck) ultra saflıktadır. Tüm standart ve çözeltiler ultra saf su ile hazırlanmıştır. Analizlerin doğruluğunu test etmek için sertifikalı referans materyal (UME EnvCRM 03) kullanılmıştır. Ayrıca toprakların pH'ını ölçmek için saturasyon çamuru hazırlanmış ve ölçüm yapılmıştır (Tüzüner, 1990).

Tablo 1. Toprak örneklerinin koordinat bilgileri

Örnek No	KOORDİNATLAR	
	ENLEM	BOYLAM
T1(Başören)	37° 1'37.08"K	39° 4'55.87"D
T2(Yaşar)	37° 1'59.51"K	39° 9'12.77"D
T3(Arıcan 1)	36° 44'2.31"K	39° 0'42.98"D
T4(İkizce)	36° 46'0.60"K	39° 0'9.12"D
T5(Küplüce)	36°48'38.45"K	39° 1'10.63"D
T6(Gülveren)	36°45'21.74"K	38°58'16.63"D
T7(Koruklu)	36° 54'7.28"K	38°54'46.03"D
T8(Harran)	36°51'39.73"K	39° 0'27.26"D
T9(Banarlı)	36°56'29.09"K	39° 5'57.72"D
T10(Buğdaytepe)	36°53'25.53"K	39° 0'45.57"D
T11(Keçikıran)	36° 58'4.65"K	38°58'58.16"D
T12(Selman)	36°58'11.66"K	39° 1'19.03"D
T13(Hacıekber)	36°48'57.44"K	38° 56'7.06"D
T14(Küpelı)	36°57'21.30"K	39° 6'13.03"D
T15(Gürgelen)	36°49'39.43"K	39° 4'56.11"D
T16(Vergili)	36°59'40.81"K	39° 5'30.70"D
T17(Arıcan 2)	36°43'58.00"K	39° 2'34.42"D
T18(Yukarıderen)	36°46'32.10"K	39° 1'54.57"D
T19(Harran)	36°52'17.59"K	39° 2'12.53"D
T20(Ambartepı)	37° 3'47.19"K	38°56'22.71"D
T21(Toytepe)	36°50'43.04"K	39° 4'43.46"D
T22(Yamaçaltı)	36°58'13.63"K	38°56'33.57"D
T23(Yardımlı)	36°54'48.92"K	39° 4'18.01"D
T24(Doruç)	36°54'30.37"K	38°59'2.29"D
T25(Turluk)	37° 0'15.92"K	38° 56'1.59"D
T26(Köprölük)	37° 5'37.10"K	38°53'54.23"D



Şekil 1:
Çalışma alanının coğrafik görünümü ve örnekleme noktalarının lokasyonları

2.4. İstatistiksel Analizler

Çoklu faktörler arasındaki ilişkileri ölçmek ve açıklamak için multi istatistiksel teknikler kullanılmıştır (Abdel-Fattah ve diğ., 2021). Örneklerin ağır metal konsantrasyonlarının istatistiksel değerlendirilmesi için çeşitli analizler (Pearson Korelasyon Matrisi, Faktör Analizi (FA) ve Kümeleme Analizi (KA)), IBM'in SPSS-25 yazılımı (Sosyal Bilimler için İstatistik Paketi) kullanılarak yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Toprağın Ağır Metaller Açısından Genel Kalite Değerlendirmesi

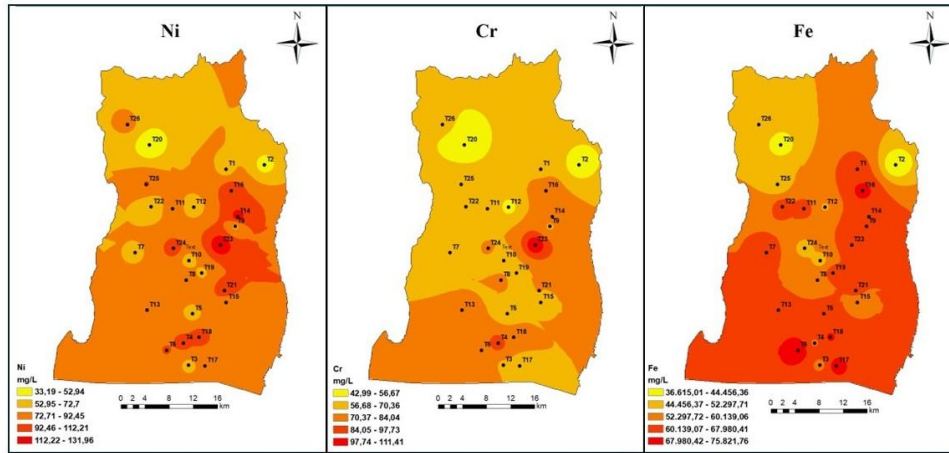
Harran Ovası drenaj kanallarına en yakın mesafedeki toprakların ağır metal analizleri, Mayıs 2020 – Ekim 2020 tarihlerinde iki dönem olarak alınan 26 örnekleme noktasından elde edilen 16 parametreden oluşan veriler kullanılarak değerlendirilmiştir. Tablo 2' de toprak örneklerinin pH ve ağır metal değerleri istatistiksel özeti (ortalama, minimum, maksimum ve standart sapma [SD]) yer almakta olup, ayrıca toprak kirliliği için Ulusal yönetmelik olan Çevre ve Şehircilik Bakanlığı “Toprak Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği” (TKKY) ve Uluslararası standart olan Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Dünya Tarım Örgütü (FAO) tarafından izin verilen ve istenen sınır değerleri aşan örneklerin yüzdeleri de sunulmaktadır.

Mayıs ve Ekim olmak üzere iki dönem, 26 örnekleme noktasından alınan toprak örneklerinde pH değerleri 7,18 – 8,10 arasında değişmiştir. Al değerleri 34 790 – 123 500 mg/L arasında, Ba değerleri 87,6 – 207,1 mg/L arasında, Be değerleri <DL – 1,462 mg/L arasında değişmiştir. Cd değerleri ise 0,10 – 0,53 mg/L arasında değişirken, TKKY ve WHO/FAO'ya göre sınır değer olan 3 mg/L'nin üzerinde sonuç bulunmamıştır. Co değerleri 5,59 – 20,61 mg/L arasında değişirken TKKY ve WHO/FAO'ya göre sırasıyla sınır değer olan 80 ve 50 mg/L'nin üzerinde sonuç belirlenmemiştir. Cr değerleri ise 39,18 – 141,30 mg/L arasında değişirken, TKKY ve WHO/FAO'ya göre sınır değer olan 100 mg/L'i aşan % 1,92 örnek olmuştur. Cu değerleri ise, 6,45 – 38,82 mg/L arasında değişirken, TKKY ve WHO/FAO'ya göre sırasıyla sınır değer olan 140 ve 100 mg/L'nin üzerinde sonuç bulunmamıştır. Fe değerleri ise, 33 440 – 88 570 mg/L arasında değişirken WHO/FAO'ya göre sınır değer olan 50 000 mg/L'nin üzerinde % 76,92 örnek olmuştur. T2(Yaşar), T10(Buğdaytepe), T20(Ambartepe), T24(Doruç), T25(Turluk), T26(Köprülük) noktaları dışındaki noktalar Fe açısından toksik sınırın üzerinde yer almıştır. T23(Yardımlı) noktası Cr ve Fe açısından en yüksek kirliliğe sahip nokta olmuştur. Demir toprakta en çok bulunan elementlerden biri olmasına rağmen genellikle bitkilerin yararlanabileceği formda değildir (Şimşek ve diğ., 2021). Li değerleri 31,74 – 92,13 mg/L arasında değişirken, Mn değerleri 415,6 – 1246 mg/L arasında değişmiştir. Mo değerleri <DL – 2,949 mg/L arasında değişirken, Ni konsantrasyonu 13,96 – 149,60 mg/L arasında değişmiştir. TKKY'ya göre Ni sınır değeri 75 mg/L'in üzerinde % 63,46 örnek olurken, WHO/FAO'ya göre sınır değer olan 50 mg/L'nin üzerinde % 80,77 örnek olmuştur. T4, T6, T8, T11, T13, T14, T16, T18, T21, T23, T24, T25, T26 örnekleme noktaları Ni açısından sınır değerinin üzerinde yer alan noktalar olmuştur. Ni, magmatik kayalarda serbest metal veya demirle kompleks halinde bol miktarda bulunur. Ek olarak, antropojenik aktiviteler eritme, fosil yakıt yakma, araç emisyonları, evsel, belediye ve endüstriyel atıkların bertarafı, metal madenciliği, gübre uygulaması ve organik gübreler gibi çeşitli kaynaklar yoluyla toprağa Ni salmaktadır (Hassan ve diğ., 2019; Koca, 2019; Nasr ve Zahran, 2015; Salt ve diğ., 2020; Yerli ve diğ., 2020; Yusuf ve diğ., 2011). Pb değerleri 1,28 – 10,35 mg/L arasında, V değerleri 15,27 – 69,03 mg/L arasında, Zn değerleri ise 12,01 – 85,35 mg/L arasında değişmiştir. Pb, V ve Zn için TKKY ve WHO/FAO'ya göre belirlenen sınır değerlerinin üzerinde örnek olmamıştır.

Özet olarak; analizi yapılan bütün parametrelerden sadece Cr, Fe ve Ni parametreleri açısından toksik sınırın üzerinde yeralan örnekleme noktaları olmuştur. Bu üç elemente ait alansal dağılım haritaları Şekil 2'de verilmiştir. Alansal dağılım haritalarını incelediğimizde kirlilik yükünün ovanın kuzeyinden güneyine (Suriye sınırı) doğru arttığı görülmüştür. Ovanın orta kesiminde yeralan Karaali kaplıcalarının, bu kirlilik yükünün orta kesimde de artmasında etkili olduğu kanısına varılmıştır.

Tablo 2. Toprak örneklerinde ağır metal parametrelerinin tanımlayıcı istatistikleri ve sınır değerlerle karşılaştırılması

Parametre	Birim	Min	Max	Ort.	SD	TKKY (2005) Sınır değeri (pH>6)	Limit aşan (%)	WHO ve FAO Sınır değeri	Limit aşan (%)
pH	-	7,18	8,10	7,61	0,21	-	-	-	-
Al	(mg/L)	34 790	123 500	73 400	19 259	-	-	-	-
Ba	(mg/L)	87,6	207,1	154,75	32,01	-	-	-	-
Be	(mg/L)	<DL	1,462	0,577	0,35	-	-	-	-
Cd	(mg/L)	0,10	0,53	0,28	0,10	3	-	3	-
Co	(mg/L)	5,59	20,61	11,81	4,04	80	-	50	-
Cr	(mg/L)	39,18	141,30	68,74	15,82	100	% 1,92	100	% 1,92
Cu	(mg/L)	6,45	38,82	18,64	7,74	140	-	100	-
Fe	(mg/L)	33 440	88 570	59 207	11 895	-	-	50 000	% 76,92
Li	(mg/L)	31,74	92,13	58,07	13,83	-	-	-	-
Mn	(mg/L)	415,6	1246,0	892,95	191,46	-	-	2 000	-
Mo	(mg/L)	<DL	2,949	1,107	0,85	-	-	-	-
Ni	(mg/L)	13,96	149,60	80,64	32,10	75	% 63,46	50	% 80,77
Pb	(mg/L)	1,28	10,35	6,77	2,73	300	-	100	-
V	(mg/L)	15,27	69,03	38,67	11,68	-	-	-	-
Zn	(mg/L)	12,01	85,35	52,03	23,55	300	-	300	-



Şekil 2:
Cr, Fe ve Ni parametrelerine ait alansal dağılım haritaları

Harran Ovası topraklarının ortalama analiz sonuçlarını Türkiye ve dünya’da yapılan farklı çalışmalarla kıyasladığımızda (Tablo 3), Al ve Fe sonuçlarının bu çalışmaların hepsinden yüksek olduğu, Ba sonuçlarının ise bütün çalışmalardan düşük olduğu belirlenmiştir. Cd, Co, Cr, Cu, Pb, V sonuçlarının çalışmaların çoğundan düşük olduğu görülmüştür. Ni sonuçları Mısır, Pakistan, Trakya Bölgesi sonuçlarından yüksek; Bursa, Sinop, Kütahya, Konya, Uşak sonuçlarından düşük olarak belirlenmiştir (Arık ve Yıldız, 2010; Aydınalp ve Marinova, 2003; Baltas ve diğ., 2020; Coşkun ve diğ., 2006; Elbana ve diğ., 2013; Horasan ve Arık, 2019; Mushtaq ve Khan, 2010; Yıldız ve Özkul, 2024).

Tablo 3. Harran Ovası topraklarının diğer çalışmalarla karşılaştırılması

	Al	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn
Mısır(Elbana ve diğ., 2013)			1,63			14,59				4,73	10,27		
Pakistan (Mushtaq ve Khan, 2010)			2,0		63,8	22,8	18440			61,4	28,6		49,7
Bursa ili(Aydınlı ve Marinova, 2003)					125	40		1667		158	81		477
Trakya Bölgesi (Coşkun ve diğ., 2006)		550	0,2	11	173	20	26900	600	0,6	50	33	78	45
Sinop ili (Baltas ve diğ., 2020)					194,73	43,19	38849			85,02	17,01		65,1
Kütahya(Arık ve Yıldız, 2010)	65000	718,4	1,5	15,9	202,6	32,6	39000	1100	0,4	89,9	82,6	119,3	165,3
Konya (Horasan ve Arık, 2019)	44300	400,78	0,21	15,56	109,97	20,79	24300	524,41	1,18	130,68	21,22	62,93	56,60
Uşak (Yıldız ve Özkul, 2024)						17,29		596		265,32	15,89		
Bu çalışma	73400	154,75	0,28	11,81	68,74	18,64	59207	892,95	1,107	80,64	6,77	38,67	52,03

*Bütün birimler mg/kg'dır.

3.2. Verilerin Multi-istatistiksel Değerlendirmesi

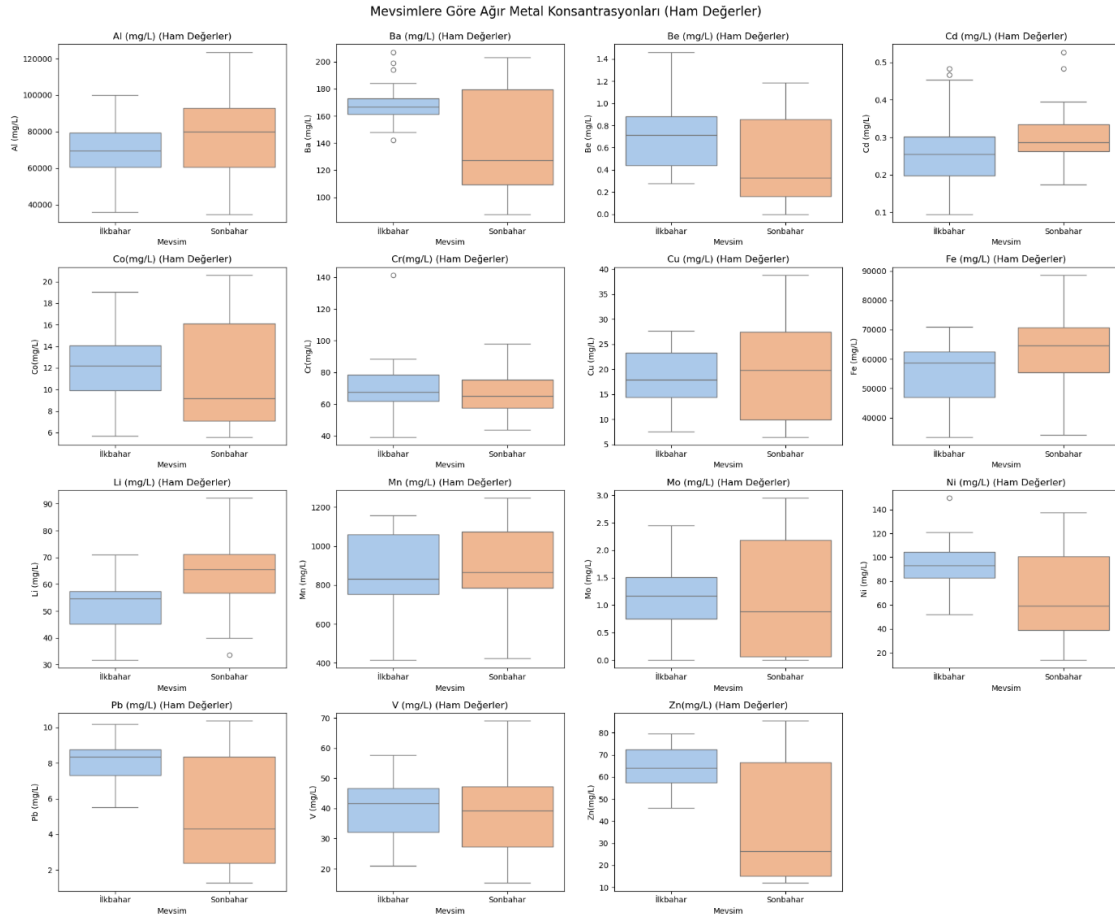
Ağır metal parametrelerini etkileyen farklı kirlilik kaynaklarını belirlemek için one way ANOVA, Pearson Korelasyon Matrisi, FA ve KA istatistiksel analizleri kullanıldı (Qishlaqi ve diğ., 2009; Yang ve diğ., 2022).

Toprak örneklerinin (ağır metal konsantrasyonlarının) ortalama değerlerinin tanımlanan gruplar(örnekleme noktaları ve dönemler) arasında farklılık gösterip göstermediğini test etmek için veri setine one way ANOVA uygulandı (Qishlaqi ve diğ., 2009; Obisesan ve Mustapha, 2021). Örnekleme noktaları arasındaki farklılığı görmek için yapılan one way ANOVA analiz sonucuna göre; Al, Cd, Cr, Fe, Li, Mn, Mo ve V için $p < 0,05$ olduğundan % 95 güven aralığında örnekleme noktaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark vardır. Ancak Ba, Be, Co, Cu, Ni, Pb ve Zn için $p > 0,05$ olduğundan % 95 güven aralığında anlamlı bir fark belirlenememiştir (Tablo 4). Dönemler arasındaki farklılığı belirlemek için yapılan one way ANOVA analizinde ise; Ba, Be, Fe, Li, Ni, Pb ve Zn için $p < 0,05$ olduğundan % 95 güven aralığında dönemler arasında anlamlı bir fark vardır. Al, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo ve V değerleri bakımından $p > 0,05$ olduğu için % 95 güven aralığında dönemler arasında anlamlı bir fark yoktur.

Tablo 4. Örnekleme noktaları ve dönemleri için one way ANOVA testi anlamlılık düzeyleri (p) değerleri

Parametreler	Örnekleme noktaları			Dönem		
	df	F	Sig.(p-value)	df	F	Sig.(p-value)
Al	25	2,679	0,008	1	3,127	0,083
Ba	25	0,945	0,555	1	13,402	0,001
Be	25	1,568	0,131	1	5,594	0,022
Cd	25	2,309	0,019	1	2,326	0,134
Co	25	1,588	0,124	1	0,679	0,414
Cr	25	2,960	0,004	1	1,172	0,284
Cu	25	1,188	0,333	1	0,036	0,850
Fe	25	2,067	0,036	1	5,752	0,020
Li	25	2,527	0,011	1	12,136	0,001
Mn	25	54,349	0,000	1	0,160	0,691
Mo	25	3,169	0,002	1	0,012	0,913
Ni	25	1,081	0,422	1	9,208	0,004
Pb	25	0,958	0,541	1	17,339	0,000
V	25	2,724	0,007	1	0,192	0,663
Zn	25	0,918	0,584	1	18,932	0,000

Şekil 3.'de, ağır metal parametrelerinin ham (normalize edilmemiş) değerlerine göre ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde toprakta nasıl dağıldığı kutu grafikleri ile gösterilmektedir. Grafiklerde mevsimsel farklılıklar daha gerçekçi ve mutlak değerler üzerinden izlenebilmektedir. Yapılan analizler sonucunda, bazı ağır metal elementlerinin toprakta mevsimsel olarak anlamlı farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle Zn, Pb, Ni gibi toksik metallerin ilkbaharda daha yüksek konsantrasyonlara sahip olması dikkat çekicidir. Bu durum, ilkbahar aylarında artan tarımsal faaliyetler, gübreleme uygulamaları ve yağışlarla birlikte metallerin yüzey akışı yoluyla toprağa taşınmasından kaynaklanabilir (Azhar ve diğ., 2022). Öte yandan, Li, Mo, Cu ve Fe gibi bazı elementlerin ise sonbaharda daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmektedir. Bu farklılıklar, mevsimsel olarak değişen toprak kimyası, sıcaklık ve nem oranlarının elementlerin çözünürlüğü ve hareketliliği üzerindeki etkilerinden kaynaklanıyor olabilir (Yetiş ve diğ., 2021). Bazı elementlerde (örneğin Cd, Mn, Cr) ise mevsimsel farklar sınırlı kalmıştır. Genel olarak bakıldığında, ilkbahar ve sonbahar arasında belirli metallerin çevresel ve antropojenik etkilere duyarlılık gösterdiği, bu durumun da toprak kalitesi ve çevresel risk değerlendirmesi açısından önemli bir gösterge olduğu söylenebilir (Şimşek ve diğ., 2021; Yerli ve diğ., 2020)

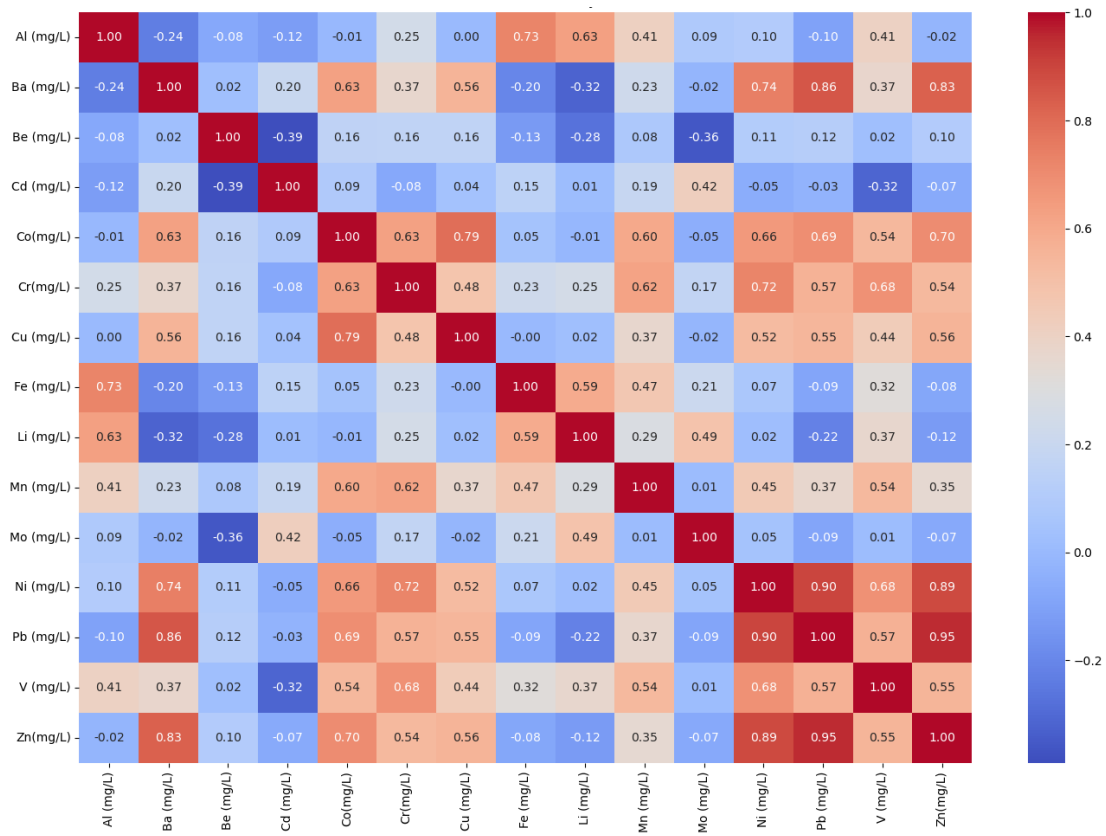


Şekil 3:

Mevsimlere göre ağır metal konsantrasyonlarına ait kutu grafikleri

Korelasyon analizi, ölçülen parametrelerin birbiriyle olan ilişkisini belirlemek için yapılan bir istatistiksel analiz çeşididir. Drenaj kanalları yakınındaki topraklarda belirlenen ağır metal parametrelerinin çoğunun birbirleriyle istatistiksel olarak anlamlı korelasyonlara sahip olduğu ve yakın ilişkili olduğu görülmüştür.

26 örnekleme noktasından gelen veriler birleştirilerek 15 ağır metal parametresinin korelasyon matrisi hesaplanmış ve değişkenler arasındaki korelasyonlar heatmap korelasyon analizi kullanılarak değerlendirilmiştir (bkz. Şekil 4). Ni, Pb ($r = 0,90$) ve Zn ($r = 0,89$) ile güçlü pozitif korelasyon göstermiştir. Ba aynı şekilde Pb ($r = 0,86$) ve Zn ($r = 0,83$) ile güçlü pozitif korelasyon göstermiştir. Benzer şekilde Pb ve Zn ($r = 0,95$) arasında da çok güçlü pozitif korelasyon belirlenmiştir. Cu ve Co ($r = 0,79$) arasında da güçlü pozitif korelasyon belirlenmiştir. Co; Cr ($r = 0,63$), Mn ($r = 0,60$), Ni ($r = 0,66$), Pb ($r = 0,69$), V ($r = 0,54$) ve Zn ($r = 0,70$) ile pozitif korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Benzer şekilde Al, Fe ($r = 0,73$) ve Li ($r = 0,63$) ile pozitif korelasyon göstermiştir. Cr ise Mn ($r = 0,62$), Ni ($r = 0,72$), Pb ($r = 0,57$), V ($r = 0,68$), Zn ($r = 0,54$) ile pozitif korelasyon göstermiştir. Pb ve Zn parametreleri hem birbirleriyle hem de diğer ağır metallerle korelasyon analizinde en dikkat çekici parametreler olmuştur. Zn gübrelerde yüksek konsantrasyonlarda bulunan ve mineral olarak bitkilere optimum düzeyde verilmesi gereken bir elementtir (Şimşek ve diğ., 2021; Yerli ve diğ., 2020). Pb'da tarım ilaçlarında bulunabilen ve aynı zamanda araç yakıtlarında bulunan bir ağır metal olduğundan tarımın yoğun yapıldığı Harran Ovası'nda bu iki elementin birbiriyle güçlü korelasyon göstermesi beklenen bir durumdur (Kara ve diğ., 2022; Kara ve diğ., 2023; Yetiş ve diğ., 2021).



Şekil 4:
Toprak örneklerinde ağır metal parametrelerinin korelasyon matrisi

Tablo 5'de gösterildiği gibi, Harran Ovası drenaj kanalları yakınındaki topraklarda yapılan 15 ağır metal parametresinin beklenen kaynaklarını belirtmek için faktör analizi kullanılmıştır (Kara ve diğ., 2021). Mevcut çalışmada temel bileşen analizine Varimax rotasyonu uygulandı. Yükleme katsayısı $> 0,75$ olan bileşenler yorumlama açısından "güçlü öneme" sahip olarak kabul edilirken, $0,50$ ile $0,75$ arasındakiler "orta öneme" sahip ve $0,50$ ile $0,30$ arasındakiler "zayıf öneme" sahip olarak kabul edilir.

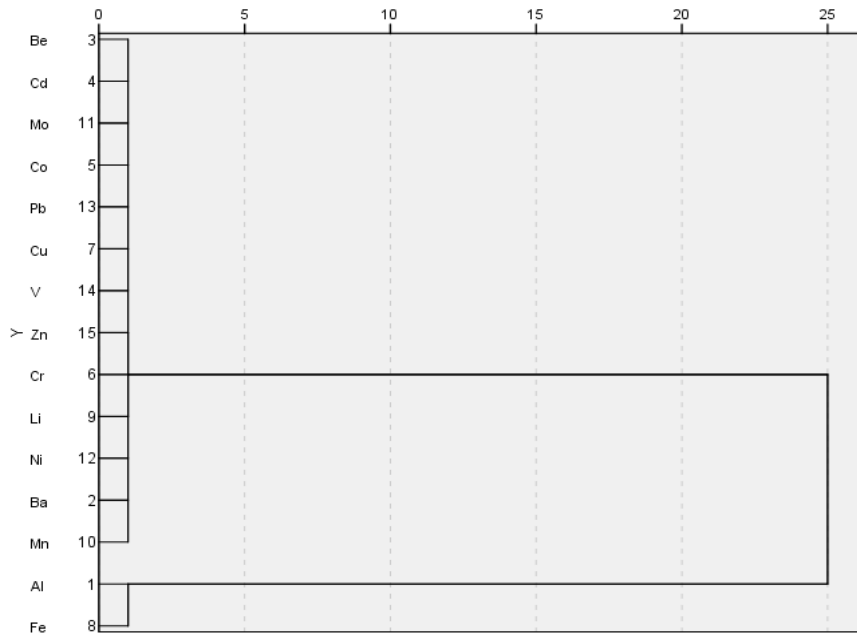
Eigenvalue > 1 olan değişkenlerden temel faktörler çıkarıldı. Initial eigenvalue sonuçlarına göre, scree plot ile çıkarılan üç temel bileşen toplam varyansın % 78,89'unu açıkladı (Chudasama ve diğ., 2024; Jiang ve Guo, 2019; Liu ve diğ., 2023; Qishlaqi ve diğ., 2009). Birinci faktör (F1), toplam varyansın % 46,52'sini açıklarken, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V ve Zn'nin güçlü pozitif yüklemeye sahip olduğu görüldü. Ayrıca Ba, Fe'nin orta düzeyde pozitif yüklemeye, Al ve Li'nin zayıf pozitif yüklemeye sahip olduğu belirlendi. İkinci faktör (F2), toplam varyansın % 66,46'sını açıklarken Al'nin güçlü pozitif yüklemeye sahip olduğu görüldü. Ba, Cd'un orta düzeyde negatif yüklemeye, Fe ve Li'nin orta düzeyde pozitif yüklemeye, Cu'nin ise zayıf düzeyde negatif yüklemeye sahip olduğu belirlendi. Üçüncü faktör (F3), toplam varyansın % 78,89'unu açıklarken Mo'nin güçlü pozitif yüklemeye, Be'un orta düzeyde negative yüklemeye, Cd'un orta düzeyde pozitif yüklemeye, Li'nin ise zayıf düzeyde pozitif yüklemeye sahip olduğunu gösterdi.

Table 5. Çalışma alanında ağır metal parametreleri için açıklanan toplam varyans ve bileşen matrisi

	Faktörler		
	F1	F2	F3
Al	0,412*	0,772***	-0,047
Ba	0,664**	-0,652**	0,117
Be	0,029	0,123	-0,725**
Cd	0,250	-0,568**	0,604**
Co	0,896***	-0,227	-0,139
Cr	0,882***	0,177	0,071
Cu	0,768***	-0,339*	-0,207
Fe	0,514**	0,666**	0,083
Li	0,427*	0,735**	0,310*
Mn	0,802***	0,144	-0,093
Mo	0,181	0,203	0,859***
Ni	0,932***	-0,036	0,052
Pb	0,887***	-0,360	-0,076
V	0,753***	0,439*	-0,147
Zn	0,889***	-0,253	-0,105
Eigenvalue	6,978	2,991	1,865
Total variance (%)	46,521	19,938	12,430
Cumulative variance (%)	46,521	66,459	78,889

*zayıf, 0,50 – 0,30, **orta, 0,50 – 0,75, ***güçlü, > 0,75

Ağır metallerin potansiyel kaynaklarını daha fazla araştırmak için kümeleme analizi yapıldı. Şekil 5, iki ana kümenin tanımlandığını göstermektedir. İlk küme (Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Ni, Mn, Mo, Pb, V, Zn) oluşmaktadır. İkinci küme ise toprakta en bol bulunan mineraller olan Al ve Fe'den oluşmaktadır (Azhar ve diğ., 2022; Şimşek ve diğ., 2021).



Şekil 5:
Toprak örneklerinin kümeleme analizi

4. SONUÇLAR

Harran Ovası'nın 1995'de sulamaya açılmasından sonra ovada aşırı ve kontrolsüz sulama, gübreleme, ilaçlama, yetersiz drenaj gibi nedenlerden dolayı toprakta tuzlanma, çoraklaşma ve verim kaybı olmuştur. Söz konusu etkenlerden dolayı topraklarda tuz, ağır metal, pestisit vb toksik maddeler birikmeye başlamıştır. Bu nedenle Harran Ovası'ndan sulama sezonu başı ve sonu olmak üzere iki dönem toplanan toprak örneklerinde ölçülen ağır metal verileri, ulusal ve uluslararası mevzuata göre mukayese edildiğinde; Cr, Fe ve Ni parametreleri açısından sınır değerleri aşmıştır. T23(Yardımlı) noktası her üç parametre açısından yüksek olmasına rağmen Cr konsantrasyonu açısından toksik sınırı aşan tek noktadır. Fe konsantrasyonu açısından T2(Yaşar), T10(Buğdaytepe), T20(Ambartepe), T24(Doruç), T25(Turluk), T26(Köprülük) noktaları dışındaki noktalar toksik sınırın üzerindedir. Ni konsantrasyonu açısından ise T4, T6, T8, T11, T13, T14, T16, T18, T21, T23, T24, T25, T26 noktaları sınır değerin üzerinde ölçülmüştür. One way ANOVA, Pearson Korelasyon Matrisi, FA ve KA gibi multi – istatistiksel analiz teknikleri kullanılarak ağır metal parametrelerini etkileyen farklı kirlilik kaynakları araştırılmıştır. Buna göre Ni, Pb ve Zn ilkbaharda (sulama sezonunun başı) daha yüksek konsantrasyonlarda görülmüştür. Ova geneli düşünüldüğünde tarımsal faaliyetlerde kullanılan gübre ve ilaçlarda bulunabilen bu elementler sulama sezonu başında; gübreleme, ilaçlama, arazi sürümü vb tarımsal faaliyetlerin yoğunluk kazanmasıyla daha yüksek miktarlarda görülmesi beklenen bir durumdur. Bununla birlikte ovada kirlilik yükünün taşınımı ovanın kuzeyinden güney kesimine (Suriye sınırına) doğru olmaktadır. Ovanın orta kesiminde ise Karaali kaplıca sularından dolayı Cr, Fe ve Ni parametreleri için en yüksek değerler tespit edilmiştir.

Sonuç itibari ile; ağır metal, pestisit, nitrat vb kirlilik yüküne sahip olan drenaj suları ile etkileşimde olan veya sulanan toprakların bu kirlilik yükünden etkilendiği görülmüştür. Oluşan drenaj sularının tekrar tarımda kullanılabilmesi için sulama suyu kriterlerini sağlayacak şekilde kirliliğin önlenmesi, aşırı sulama ve gübrelemeden kaçınılması, çiftçilerin sulama ve gübreleme konusunda bilinçlendirilmesi, ovadaki drenaj alt yapısının iyileştirilmesi vb önlemlerle Harran Ovası gibi tarımın çok eski tarihlerden beri yapıldığı, çok verimli topraklara sahip bir ovanın topraklarının korunması gerekli ve önemlidir.

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleşmesinde çalıştığı kurum olan GAP Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü'ne laboratuvar imkânı sağlama vb desteklerinden dolayı içtenlikle teşekkür eder.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Hatice KARA; çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, verilerin toplanması ve laboratuvar analizlerinin yapılması, sonuçların değerlendirilip yorumlanması, makalenin yazılması olmak üzere bütün aşamaları tek yazar olarak gerçekleştirmiştir.

KAYNAKLAR

1. Abdel-Fattah, M. K., Mohamed, E. S., Wagdi, E. M., Shahin, S. A., Aldosari, A. A., Lasaponara, R. ve Alnaimy, M. A. (2021) Quantitative evaluation of soil quality using Principal Component Analysis: The case study of El-Fayoum depression Egypt. *Sustainability*, 13(4), 1824. doi:10.3390/su13041824
2. Ağca, N. ve Ergezer, Ş. (1995) Harran ovası topraklarında drenaj, tuzluluk ve alkalilik sorunları. *Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 1(3), 81-90.
3. Anonim (2010) “27605 sayılı 08.06.2010 tarihli Toprak Kirliliği Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik (TKKY 2010/27605).
4. Arık, F. ve Yıldız, T. (2010) Heavy metal determination and pollution of the soil and plants of southeast Tavşanlı (Kütahya, Turkey). *Clean-Soil, Air, Water*, 38(11), 1017-1030. doi:10.1002/clen.201000131
5. Aydınalp, C. ve Marinova, S. (2003) Distribution and forms of heavy metals in some agricultural soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, 12(5), 629-633.
6. Azhar, U., Ahmad, H., Shafqat, H., Babar, M., Munir, H. M. S., Sagir, M., ... ve Khoo, K. S. (2022) Remediation techniques for elimination of heavy metal pollutants from soil: A review. *Environmental Research*, 214, 113918. doi:10.1016/j.envres.2022.113918
7. Baby, J., Raj, J. S., Biby, E. T., Sankarganesh, P., Jeevitha, M. V., Ajisha, S. U. ve Rajan, S. S. (2010) Toxic effect of heavy metals on aquatic environment. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(4). doi:10.4314/ijbcs.v4i4.62976
8. Bahçeci, İ. ve Bal, N. M. (2008) Harran Ovasında yüzeyaltı drenaj sistemi kurulmuş alanlarda drenaj suyu ve toprak tuzluğunun mevsimsel değişimi. *Journal of the Faculty of Agriculture of Harran University (Turkey)*, 12(3).
9. Baltas, H., Sirin, M., Gökbayrak, E., ve Özcelik, A. E. (2020) A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey. *Chemosphere*, 241, 125015. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125015
10. Chudasama, T., Dangar, K., Gadhvi, K., Vyas, S. ve Dudhagara, D. (2024) Multivariate statistical analysis of bioavailability of heavy metals and mineral characterization in selected species of coastal flora. *Scientific Reports*, 14(1), 11282. doi:10.1038/s41598-024-62201-0
11. Coşkun, M., Steinnes, E., Frontasyeva, M. V., Sjobakk, T. E. ve Demkina, S. (2006) Heavy metal pollution of surface soil in the Thrace region, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 119, 545-556. doi:10.1007/s10661-005-9042-3
12. Çullu, M. A., Almaca, A., Öztürkmen, A. R., Ağca, N., İnce, F., Derici, R. ve Seyrek, A. (2000) Harran ovası topraklarında tuzluluğun yayılma olasılığının belirlenmesi. *Harran Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, GAP Tarımsal Araştırma-İnceleme ve Geliştirme Projesi*, 4.
13. De Wrachien, D., Schultz, B. ve Goli, M. B. (2021) Impacts of population growth and climate change on food production and irrigation and drainage needs: A world-wide view. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 981-995. doi: 10.1002/ird.2597
14. DSİ (Devlet Su İşleri) (1972) Harran Ovası hidrojeolojik etüdü, pp. 49, DSİ printing office, Ankara.
15. DSİ 2014 Faaliyet Raporu (2015). DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara.
16. Elbana, T. A., Ramadan, M. A., Gaber, H. M., Bahnassy, M. H., Kishk, F. M. ve Selim, H. M. (2013) Heavy metals accumulation and spatial distribution in long term wastewater

- irrigated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 925-933. doi:10.1016/j.jece.2013.08.005
17. Fu, Z., ve Xi, S. (2020) The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods*, 30(3), 167-176. doi:10.1080/15376516.2019.1701594
 18. Hassan, M. U., Chattha, M. U., Khan, I., Chattha, M. B., Aamer, M., Nawaz, M., ... ve Khan, T. A. (2019) Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 12673-12688. doi:10.1007/s11356-019-04892-x
 19. Hong-gui, D., Teng-Feng, G., Ming-Hui, L., ve Xu, D. (2012) Comprehensive assessment model on heavy metal pollution in soil. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(6), 5286-5296. doi:10.1016/S1452-3981(23)19621-0
 20. Horasan, B. Y. ve Arik, F. (2019) Assessing heavy metal pollution in the surface soils of Central Anatolia Region of Turkey. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 14(1), 107-118. doi:10.26471/cjees/2019/014/063
 21. Jiang, Y. ve Guo, X. (2019) Multivariate and geostatistical analyses of heavy metal pollution from different sources among farmlands in the Poyang Lake region, China. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 2472-2484. doi:10.1007/s11368-018-2222-x
 22. Kacar, B. (2009) Toprak Analizleri. Nobel Yayın No:1387, Fen Bilimleri: 90, Nobel bilim ve araştırma merkezi yayın no:44, ISBN 978 – 605 – 395 – 184 – 1, s: 467, Ankara.
 23. Kara, H., Demir Yetis, A. ve Temel, H. (2021) Assessment of heavy metal contamination in groundwater of Diyarbakir Oil Production Area,(Turkey) using pollution indices and chemometric analysis. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-15. doi:10.1007/s12665-021-10011-2
 24. Kara, H., Yetis, A. D. ve Kalkan, S. (2022) The impact of geothermal fluid discharge on drainage water and groundwater quality in terms of toxic contaminants in the agricultural Harran Plain, Turkey. *Geothermics*, 105, 102502. doi:10.1016/j.geothermics.2022.102502
 25. Kara, H., Demir Yetiş, A., Kalkan, S. ve Yetiş, R. (2023) Evaluation of pollution indicators and transported sediment content in agricultural drainage waters for reuse as irrigation, Harran Plain, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(24), 64982-64993. doi:10.1007/s11356-023-26880-y
 26. Karaaslan, Y. (2020) Tarımsal Sulamadan Dönen Suların Yeniden Kullanımı. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 8(2), 230-236. doi: 10.21541/apjes.615091.
 27. Koca, Y. K. (2019) Termik santralin çevresel kirletici etkisinin toprak kirlilik yönetmelikleri çerçevesinde değerlendirilmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22, 148-153. doi:10.18016/ksutarimdog.vi.533995
 28. Kurniawan, T. A., Chan, G. Y., Lo, W. H. ve Babel, S. (2006) Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 118(1-2), 83-98. doi:10.1016/j.cej.2006.01.015
 29. Liu, W. H., Zhao, J. Z., Ouyang, Z. Y., Söderlund, L. ve Liu, G. H. (2005) Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China. *Environment International*, 31(6), 805-812. doi:/10.1016/j.envint.2005.05.042
 30. Liu, J., Kang, H., Tao, W., Li, H., He, D., Ma, L., ... ve Li, X. (2023) A spatial distribution–Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil. *Science of The Total Environment*, 859, 160112. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160112

31. Mahurpawar, M. (2015) Effects of heavy metals on human health. *International Journal of Research Granthaalayah*, 530(516), 1-7.
32. Mapanda, F., Mangwayana, E. N., Nyamangara, J. ve Giller, K. E. (2005) The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107(2-3), 151-165. doi:10.1016/j.agee.2004.11.005
33. Megersa, G. ve Abdulahi, J. (2015) Irrigation system in Israel: A review. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 7(3), 29-37. doi:10.5897/IJWREE2014.0556
34. Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Emran, T. B., Nainu, F., Khusro, A., ... ve Simal-Gandara, J. (2022) Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University-Science*, 34(3), 101865. doi:10.1016/j.jksus.2022.101865
35. Mushtaq, N. ve Khan, K. S. (2010) Heavy metals contamination of soils in response to wastewater irrigation in Rawalpindi region. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 47(3), 215-224. doi:10.5555/20113126330
36. Nasr, M. ve Zahran, H. (2015) Assessment of agricultural drainage water quality for safe reuse in irrigation applications-a case study in Borg El-Arab, Alexandria. *Journal of Coastal Life Medicine*, 3(3), 241-244. doi: 10.12980/JCLM.3.2015J5-4
37. Obisesan, K. O. ve Mustapha, I. A. (2021) Multivariate Analysis of Physico-chemical Parameters and Heavy Metals in Soil. *Transactions of the Nigerian Association Mathematical Physics*.
38. OSIB (Orman ve Su İşleri Bakanlığı) (2017) GAP Bölgesi'nde sulamadan dönen suların kontrolü ve yeniden kullanımı için iyileştirilmesinin araştırılması proje nihai raporu. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, TUBİTAK-MAM, Gebze, Kocaeli
39. Öztürkmen, A. ve Yavaş, Y. (2014) Harran Ovasındaki Bazı Toprak Serilerinin Sulama Sonrası Agregat Stabilitesinin Değişimi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 18(2), 6-12.
40. Öztürkmen, A. R. ve Yarmaç, İ. S. (2018) Harran Ovası sulamasında tekrar kullanılan drenaj sularının kullanımı ve kalitesi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 7(2), 197-204. doi:10.29278/azd.476372
41. Rahman, Z. ve Singh, V. P. (2019) The relative impact of toxic heavy metals (THMs)(arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 1-21. doi:10.1007/s10661-019-7528-7
42. Rattan, R. K., Datta, S. P., Chhonkar, P. K., Suribabu, K. ve Singh, A. K. (2005) Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 109(3-4), 310-322. doi:10.1016/j.agee.2005.02.025
43. Salt, D. E., Kato, N., Krämer, U., Smith, R. D. ve Raskin, I. (2020) The role of root exudates in nickel hyperaccumulation and tolerance in accumulator and nonaccumulator species of Thlaspi. In *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water* (pp. 189-200). CRC Press.
44. Seyrek, A., Yeşilnacar, M., Aydemir, S. ve Demir, T. (2003) Harran ovasında yeralan ortaören çökme çukurunun oluşumu ve pedo-jeolojik karakteristikleri. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (7).

45. Shifaw, E. (2018) Review of heavy metals pollution in China in agricultural and urban soils. *Journal of Health and Pollution*, 8(18), 180607. doi:10.5696/2156-9614-8.18.180607
46. Sönmez, B. (2004) Türkiye’de Çorak İslahı Araştırmaları ve tuzlu Toprakların Yönetimi. *Sulanan alanlarda Tuzluluk Yönetimi Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 20-21 Mayıs, 2004, Ankara, s.157-162
47. Sodango, T. H., Li, X., Sha, J. ve Bao, Z. (2018) Review of the spatial distribution, source and extent of heavy metal pollution of soil in China: impacts and mitigation approaches. *Journal of Health and Pollution*, 8(17), 53-70. doi:10.5696/2156-9614-8.17.53
48. Steduto, P., Schultz, B., Unver, O., Ota, S., Vallee, D., Kulkarni, S. ve Dagnino-Johns Garcia, M. (2018) Food security by optimal use of water: synthesis of the 6th and 7th world water forums and developments since then. *Irrigation and Drainage*, 67(3), 327-344. doi:10.1002/ird.2215
49. Şimşek, T., Kalkancı, N. ve Büyük, G. (2021) Tarım topraklarındaki ağır metallerin kirlilik düzeylerinin belirlenmesi: Osmaniye örneği. *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(1), 106-116. doi: 10.37908/mkubd.804262
50. Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM) (2021) Tarımsal Sulama Sektör politika belgesi 2021 – 2025, Ankara. Erişim Tarihi: 08.04.2025
51. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2024) Türkiye İstatistik Kurumu Haber Bülteni. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Nufus-Projeksiyonlari-2023-2100-53699>. Erişim Tarihi, 25.03.2025
52. Tüzüner, A. (1990) Toprak ve Su Analiz Laboratuvarları El Kitabı. T.C. Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, s: 61- 73, Ankara.
53. Qishlaqi, A., Moore, F. ve Forghani, G. (2009) Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 374-384. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.07.024
54. Yadav, M., Singh, G. ve Jadeja, R. N. (2021) Physical and chemical methods for heavy metal removal. *Pollutants and Water Management: Resources, Strategies and Scarcity*, 377-397. doi:10.1002/9781119693635.ch15
55. Yang, W., Li, F., Zhao, Y., Lu, X., Yang, S. ve Zhu, P. (2022) Quantitative analysis of heavy metals in soil by X-ray fluorescence with PCA–ANOVA and support vector regression. *Analytical Methods*, 14(40), 3944-3952. doi:10.1039/D2AY00593J
56. Yerli, C., Çakmakcı, T., Sahin, U. ve Tüfenkçi, Ş. (2020) Ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığına etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(Özel Sayı), 103-114. doi:10.46810/tdfd.718449
57. Yetiş, A. D., Kahraman, N., Yesilnacar, M. I. ve Kara, H. (2021) Groundwater quality assessment using GIS based on some pollution indicators over the past 10 years (2005–2015): A case study from semi-arid Harran plain, Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1-17. doi:10.1007/s11270-020-04963-7
58. Yıldız, U. ve Özkul, C. (2024) Heavy metals contamination and ecological risks in agricultural soils of Uşak, western Türkiye: a geostatistical and multivariate analysis. *Environmental Geochemistry and Health*, 46(2), 58. doi:10.1007/s10653-024-01856-0

59. Yusuf, M., Fariduddin, Q., Hayat, S. ve Ahmad, A. (2011) Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 86, 1-17. doi: 10.1007/s00128-010-0171-1
60. Zaynab, M., Al-Yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M., ... ve Li, S. (2022) Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University-Science*, 34(1), 101653. doi:10.1016/j.jksus.2021.101653

