



## İstanbul'daki otoyol kenarı toprak örneklerinin ağır metal konsantrasyonlarının ve jeo-birikim indeksinin değerlendirilmesi

İD Bünyamin BODUR, İD Mihriban Dilan KILIÇ, İD Murat YAYLA, İD Selda MERCAN\*

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Adli Tıp ve Adli Bilimler Enstitüsü, Büyükçekmece, İstanbul

### Öz

Bu çalışmada, İstanbul ilinin yapım yılları farklı iki otoyolu olan, E80 Tem Otoyolu ve Kuzey Marmara Otoyolu'nun farklı bölgelerinden alınan 36 adet toprak numunesinin inorganik element konsantrasyonlarının belirlenmesi, ayrıca kirlilik faktörü (CF) ve jeo-birikim ( $I_{geo}$ ) indeksi hesaplamaları yapılarak, çevre toksikolojisi ve halk sağlığı çerçevesinde değerlendirilmesi amaçlanmıştır. İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi sistemi kullanılarak 24 inorganik element aranmış ve iki otoyol arasında Li, Mg, K, Ca, Cr, Ni, As, Sr ve Ba elementleri için anlamlı fark bulunmuştur ( $p < 0.05$ ). E80 otoyolunda Zn, Cd ve Pb konsantrasyonlarının kabul edilebilir sınırın üzerinde bulunduğu, CF değerinin otoyola en yakın mesafelerde Zn elementi için orta ve çok yüksek düzeyde olduğu,  $I_{geo}$  indeksine göre ise numunelerin Mn ve Zn için Sınıf II (Kirlenmemiş-orta derecede kirlenmiş) kategorisinde olduğu belirlenmiştir. Böylelikle trafik yükünün ve kent hayatının yoğun olduğu İstanbul'da kaçınılmaz olan çevre kirliliğinin etkin bir belirteci olan yol kenarı toprak kirliliği, ekosistemin uğrayacağı zarar hakkında önemli veri sağlamıştır. Yirmi dört elementin eş zamanlı analizinin yapıldığı ilk araştırma niteliği taşıyan bu çalışma, otoyolun trafik yüküne ve kullanım yılına göre ağır metal yükünün de arttığını ve bu yükün otoyola 10 metre mesafeye kadar yüksek bulunduğunu göstermiştir. Trafik yoğunluğunun yüksek olduğu kentlerde ayrıca halk sağlığı ve çevre toksikolojisi yönünden toprak numunelerinin incelenmesinin önemini ortaya koymuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Trafik yükü, ağır metal, kirlenme faktörü, jeo-birikim indeksi, ICP-MS

### Evaluation of heavy metal concentrations and geo-accumulation index of roadside soil of highways in Istanbul

#### Abstract

In this study, it was aimed to determine the inorganic element concentrations of 36 soil samples collected from different regions of E80 Tem Highway and Northern Marmara Highway, which are two highways of Istanbul province with different construction years, and to evaluate them within the framework of environmental toxicology and public health by calculating contamination factor (CF) and geo-accumulation ( $I_{geo}$ ) indices. Twenty-four inorganic elements were analyzed by using Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry system and significant differences were found between the two highways for Li, Mg, K, Ca, Cr, Ni, As, Sr and Ba ( $p < 0.05$ ). On the E80 highway, Zn, Cd and Pb values were found to be above the acceptable limit, the CF value was found to be at moderate and very high levels for Zn element in samples closest to the highway, and according to the  $I_{geo}$  index, the samples were in Class II (Unpolluted-moderately polluted) category for Mn and Zn. Thus, roadside soil pollution, which is an effective indicator of environmental pollution, inevitable in Istanbul, where traffic load and urban life is intense, has provided important data on the damage to the ecosystem. As the first research in which twenty-four elements were analyzed simultaneously, this study showed that the heavy metal load increases according to the traffic load and the year of use of the highway and that this load is high up to 10 meters from the highway. It also revealed the importance of examining soil samples in terms of public health and environmental toxicology in cities with high traffic density.

**Keywords:** Traffic load, heavy metal, contamination factor, geo-accumulation index, ICP-MS

© 2023 Türkiye Toprak Bilimi Derneği. Her Hakkı Saklıdır

### Giriş

Toprak, kayaçların birçok farklı çevresel faktörle parçalanması sonucu meydana gelen ve içeriğinde belirli oranlarda organik ve inorganik maddeyi bulunduran karmaşık bir materyaldir ve çevresel kirleticilerin

\* Sorumlu yazar:

Tel. : 0 (536) 709 3109

E-posta : [mercans@iuc.edu.tr](mailto:mercans@iuc.edu.tr)

Makale Türü: **ARAŞTIRMA MAKALESİ**

Geliş Tarihi : 30 Mart 2023

Kabul Tarihi : 20 Mayıs 2023

e-ISSN : 2146-8141

DOI : 10.33409/tbbbd.1273865

izlenmesinde kullanılan en önemli karasal ekosistemlerden biridir (Karaca ve Mert, 2012; Kara ve Kara, 2018). Başta eser elementler ve pestisitler olmak üzere çeşitli kirleticilerin neden olduğu olumsuz etkiler insan, hayvan, bitki ve ekolojik sağlık açısından birçok tehlikeyi beraberinde getirmektedir. Bu kirleticilerin birçoğu toprakta uzun süre kalıcı olup, canlı dokularda birikebilir ve çeşitli sağlık sorunlarına neden olabilir. Toprağı kirleten bu kirleticilere maruziyet, hava, gıda, su ve toprak yoluyla olabilir (Abrahams, 2002; Shahid ve ark., 2020). Başlıca toprak kirleticileri arasında; pestisitler, organik bileşikler, radyoaktif yanma ürünleri ve ağır metaller bulunmaktadır. Topraktaki ağır metallerin çevre kirliliğine etkisinin çok fazla olduğu dünya genelinde gösterilmiş ve kendine özgü kirletici özellikleri nedeniyle çok fazla ilgi konusu olmuştur (Shi ve ark., 2007). Toprak kirletici inorganik elementlerin başında; kadmium (Cd), krom (Cr), cıva (Hg), kurşun (Pb), bakır (Cu) ve çinko (Zn) bulunmaktadır (Adimalla, 2020; Çağlarımak ve Hepçimen, 2010). Çevredeki ağır metal kirliliği, insan sağlığı ve ekolojik risk açısından kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Toprağın organik ve mikrobiyolojik kalitesinin bozulmasının en önemli nedenlerinden biri ağır metal kirliliğidir ve özellikle kentleşmiş alanlarda bu kirliliğin kaynağının, araç emisyonları, endüstriyel atıklar ve diğer benzer faaliyetler olduğu bilinmektedir (El-Zeiny ve Abd El-Hamid, 2022; Sezgin ve ark., 2004). Ağır metal maruziyetinin Dünya Sağlık Örgütü'nün belirlediği kabul edilebilir değerleri aşması durumunda, sinir sistemi, enzim sistemleri ve çeşitli organlar için sağlık riskleri oluşabilir; kalp hastalıkları, üreme anomalileri ve kanser gibi hastalıklar meydana gelebilir (Kamani ve ark., 2015; Yaylalı-Abanuz, 2019). Kentsel alandaki yüzey toprakları ve otoyol kenarındaki toprak ve toz birikintileri, atmosferik birikimden kaynaklanan ağır metal yükünün en önemli göstergeleri arasındadır (Li ve ark., 2001). Motorlu taşıt faaliyetlerinden kaynaklanan inorganik kirlilik, otoyol kenarında bulunan toprağın genellikle üst tabakasında birikme gösterir, havaya karışarak maruziyete yol açabilir ve bu maruziyet belirlenen sınır değerlerin üzerinde ise bazı olumsuz etkilere neden olabilir (Zhang ve ark., 2012). Araç emisyonlarından kaynaklanan inorganik kirliliği izlemek üzere yapılan çalışmalarda özellikle Cd, Cu, Pb ve Zn elementlerinin, benzinde, araba parçalarında, yağlama maddelerinde, endüstriyel ve yakma fırını emisyonlarında buldukları için, topraktaki kirlenmenin de temel göstergeleri olduğu bildirilmiştir (Yan ve ark., 2013).

Kentsel alanlarda yaşayan çocuklar ve yetişkinler, Pb ile kirlenmiş yüzey topraklarına doğrudan temas ile, yol kenarı toz birikintilerinin iç ve dış mekânlarda toz halinde solunması veya yutulması ile kurşuna maruz kalabilirler. Kurşun, özellikle çocuklarda kalıcı nörolojik, gelişimsel ve davranışsal bozukluklara neden olabilen toksik bir metaldir (Mercan ve ark., 2015). Benzer şekilde, Cd zehirlenmesi akciğerleri, böbrekleri, kemikleri ve üreme sistemlerini etkileyebilir. Çinko, canlılar için temel bir element olmasına rağmen, yüksek konsantrasyonlarda fitotoksiktir ve toprak verimliliğini azaltabilir. Yine aynı şekilde Zn gibi temel elementler arasında bulunan Cu, yüksek konsantrasyonlarda hem insanlar hem de hayvanlar için toksik olabilmektedir (Masoudi ve ark., 2012). Tüm bu olumsuz etkileri izleyebilmek ve ölçülebilir hale getirmek üzere, toprağın inorganik element yükü bakımından kirlilik değerini belirlemede kullanılan kirlenme faktörü (CF) hesaplamasından faydalanılmaktadır (Hakanson, 1980). Öte yandan, topraktaki inorganik kirlenmenin endüstrileşme öncesi değerleri ile günümüz değerleri arasındaki değişimi belirlemek üzere geliştirilen jeo-birikim indeksi 1969 yılında Müller tarafından geliştirilen bir formüldür ve çevre kirliliğinin izlenmesinde kullanılmaktadır (Barbieri, 2016).

Araştırmalar, trafik yoğunluğunun yüksek olduğu kentlerde ağır metallerin neden olduğu toprak kirliliğinin genellikle otoyolun her iki tarafında 1-10 metre arasında yoğunlaştığını ve otoyoldan uzaklaştıkça belirgin bir şekilde azaldığını göstermiştir. Ayrıca, yoğun trafığa rağmen, otoyol kenarı toprağındaki ağır metallerin, toprağın yüzeyinden en fazla 30 cm derinliğe kadar birikme eğiliminde olduğu bildirilmiştir (Güney ve ark., 2010). Trafik yükünün meydana getirdiği inorganik kirliliğin halk sağlığına, özellikle çocuk sağlığına olumsuz etkileri hakkında yapılan araştırmalar, otoyola yakın yerleşim yerlerinde yetişen çocukların kırsal kesimde yaşayanlara kıyasla daha fazla ağır metale maruz kaldığını ve buna bağlı olarak bazı gelişimsel bozukluklar ile karşılaştığını göstermiştir (Jung ve ark., 2021; Lima ve ark., 2023). Gerek halk sağlığı gerekse çevre toksikoloji açısından önem taşıyan otoyol kenarı toprak incelemeleri, adli bilimler için de önemli bir delil niteliği taşımakta; olay yerine ve suç-şüpheli-mağdur üçgenine dair değerli bilgiler de verebilmektedir (Karaca ve Mert, 2012; Saito ve ark. 2020).

Yapılan literatür incelemesinde çalışmaların genellikle Cd, Cr, Hg, Pb, Cu ve Zn elementleri üzerine yoğunlaştığı, daha kapsamlı bir inorganik profilleme yapılmadığı görülmüştür. Adı geçen elementlerin dışında da toprakta birikerek çevre ve halk sağlığına olumsuz etki eden ve ekosistemde toksik etki meydana getirebilen potansiyeli olan elementler bulunmaktadır ve İstanbul gibi trafik yükü birçok metropolden daha fazla olan bir şehirde geniş ölçekli bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, İstanbul ilinin iki farklı otoyolu olan Kuzey Marmara Otoyolu (KMO) ve E80 Tem Otoyolu'nun (E80) farklı bölgelerinden alınan toprak numunelerinin inorganik element konsantrasyonlarının belirlenmesi, çevresel kirlenme ve jeo-birikim indeksi hesaplamaları yapılarak çevre toksikolojisi ve halk sağlığı çerçevesinde değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

## Materyal ve Yöntem

### Denemede Numunelerin seçimi ve toplanması

Bu çalışmada numune seçimi yapılırken yapım yılları farklı olan iki otoyol seçildi, yapım tarihinin çok daha eski olması ve uzun yıllardır kullanılıyor olması nedeni ile İstanbul E80 Tem Otoyolu'nun (E80) ve 2016 yılında faaliyete giren İstanbul Kuzey Marmara Otoyolu'nun (KMO) anayola farklı uzaklıktaki noktalarından (0, 10 ve 25 m mesafe) toprak numuneleri alındı (Şekil 1). E80 otoyolunun Mahmutbey ve Bahçeşehir mevkilerinden, KMO otoyolunun Arnavutköy ve Odayeri mevkilerinden, otopana 0 metre, 10 metre ve 25 metre uzaklıklardan, her bir noktadan 3'er adet olmak üzere, toplamda 36 adet toprak numunesi toplanarak kağıt zarflarda muhafaza edildi. Her biri yaklaşık 1000 g toplanan numunelerin 5 cm derinliğe kadarki yüzey toprağı olmasına ve kaba materyalden (çakıl, bitki, cam vb.) arındırılarak toplanmasına dikkat edildi. Mevsimsel farklılıkların sonuçlara etki etmesini önlemek amacıyla, örnek toplama işlemi her iki otoyol için de aynı gün gerçekleştirildi.



No	Mevki ve Mesafe	No	Mevki ve Mesafe
1	KMO-Arnavutköy 0 m (n=3)	7	E80-Bahçeşehir 0 m (n=3)
2	KMO-Arnavutköy 10 m (n=3)	8	E80-Bahçeşehir 10 m (n=3)
3	KMO-Arnavutköy 25 m (n=3)	9	E80-Bahçeşehir 25 m (n=3)
4	KMO-Odayeri 0 m (n=3)	10	E80- Mahmutbey 0 m (n=3)
5	KMO-Odayeri 10 m (n=3)	11	E80- Mahmutbey 10 m (n=3)
6	KMO-Odayeri 25 m (n=3)	12	E80- Mahmutbey 25 m (n=3)

Şekil 1. Örnek toplama alanlarının konumu ve örnekleme noktaları

### Kimyasallar ve ekipman

Bu çalışmada gerekli tüm reaktifler ve kimyasallar analitik saflıkta kullanıldı. Nitrik asit (HNO<sub>3</sub>) %65 (v/v) ve Asetik Asit (glasiyal %100) (0.43 mol/L), örnek hazırlama ve analiz süresince kullanılmak üzere Merck Suprapur®'dan (Merck, Darmstadt, Almanya) temin edildi. Sertifikalı kalibrasyon çözeltisi (10 mg/mL) High-Purity Standards, Charleston, SC'den satın alındı. İndiyum (In) ve Galyum (Ga) (1000 mg/mL) iç standart (IS) (Absolute Standards, Inc., Hamden, CT, ABD) olarak kullanıldı. Tüm analitik ölçümler, plazma gazı olarak argon (>%99.999 saflık, Habas, Türkiye) kullanılarak yapıldı. Analitik sürecin

değerlendirilmesinde, sertifikalı toprak referans materyali olarak Organikçe Zengin Toprak BCR-700 (Institute for Reference Materials and Measurements, Belgium) kullanıldı. Asetik asit çekitleme yöntemine göre belirlenen sertifikalı referans toprak materyalinin sertifika değerleri Çizelge 1'deki gibidir. Yöntemin gerçekliği ve kalite kontrol çalışmaları bu değerler üzerinden kontrol edildi. İnorganik elementlerin tespiti için Thermo Scientific X Serisi-II İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS) (Thermo Fisher Scientific, Bremen, Almanya) ve CETAC (Omaha, Neb., ABD) Oto-Sampler Model ASX 520 otomatik örnekleyici kullanıldı. ICP-MS sisteminin analiz parametreleri Çizelge 2'de gösterildiği gibidir. Toprak numuneleri Precisa XB 220A model analitik terazi ile tartıldı. Toprak numuneleri Nüve marka etüvde kurutuldu. GFL 3017 marka çalkalayıcı ile numuneler çalkalandı. Hettic Universal 320 R model santrifüj kullanılarak santrifüj işlemi gerçekleştirildi.

Kalibrasyon çözeltileri %2'lik HNO<sub>3</sub> çözeltisi içerisinde Li, Be, Al, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Se, Sr, Cd, Sb, Ba, Pb ve U için 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 25, 50, 100, 150 ng/mL ve Mg Ca ve Zn için 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 400 ng/mL olacak şekilde hazırlandı. Sadece K, V, Rb, Sn ve Cs elementleri yarı kantitatif olarak analiz edildi. Tüm kalibrasyon çözeltilerine ve numunelere eşit konsantrasyonda IS (20 ng /mL Ga ve In) eklendi ve tüm analizler üç tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirildi.

Çizelge 1. Sertifikalı referans toprak materyalinin sertifika değerleri

Kuru Kütleye Dayalı Ekstrakte Edilebilir Kütle Oranı		
	Sertifika Değeri [mg/kg]	Belirsizlik [ $\pm$ mg/kg]
<b>Cd</b>	67.50	2.80
<b>Cr</b>	19.00	1.10
<b>Cu</b>	36.30	1.60
<b>Ni</b>	99.00	5.10
<b>Pb</b>	4.85	0.38
<b>Zn</b>	719.00	24.00

Çizelge 2. ICP-MS sisteminin analiz parametreleri

Parametre	Özellik
Radyo Frekans (RF) Gücü	1350 W
Sisleştirici Türü	Konsantrik
Sisleştirici Odası	Konik, ateşe dayanıklı cam
Sisleştirici Oda Sıcaklığı	3°C
Plazma Gaz Akış Hızı	15 L/dk.
Taşıyıcı Gaz Akış Hızı	0,89 L/dk.
Soğutucu Gaz Akış Hızı	13 L/dk.
Lens 1 Voltajı	-1420
Lens 2 Voltajı	-86.3
Lens 3 Voltajı	-197.6
Örnek Alım Süresi	45 s
Örnekler Arası Yıkama Süresi	60 s

## Örnek hazırlama ve değerlendirme

Otoyol kenarından toplanan toprak numuneleri (n=36) ince elekten geçirilip homojen hale getirildikten sonra petri kaplarına alınarak bir gece boyunca 60°C'de etüvde kurutuldu. Çekitleme işlemi sertifikalı referans materyal olarak kullanılan (Organikçe Zengin Toprak BCR-700) numunenin çekitleme prosedürü takip edilerek gerçekleştirildi (European Commission, 2007). Kurutulmuş toprak örnekleri analitik terazi ile 0.5 g olacak şekilde tartılarak 50 mL'lik falkon tüplere alındı ve üzerine 20 mL, 0.43 mol/L asetik asit çözeltisi eklendi. Numuneler 16 saat boyunca çalkalayıcıda 75 rpm devirde bekletildi, ardından 5000 rpm de 5 dk. boyunca santrifüj edilerek supernatant (süzüntü) sıvıdan 1 mL alınarak 15 mL'lik falkon tüplere aktarıldı ve her bir numuneye nihai konsantrasyonu 20 ng /mL olacak şekilde iç standart (In ve Ga karışımı) çözeltisi eklendi. %2 HNO<sub>3</sub> çözeltisi ile 10 mL'ye tamamlanıp ICP-MS sistemi ile toplam 24 inorganik elementin (<sup>7</sup>Li, <sup>9</sup>Be, <sup>24</sup>Mg, <sup>27</sup>Al, <sup>39</sup>K, <sup>44</sup>Ca, <sup>51</sup>V, <sup>52</sup>Cr, <sup>55</sup>Mn, <sup>59</sup>Co, <sup>60</sup>Ni, <sup>65</sup>Cu, <sup>66</sup>Zn, <sup>75</sup>As, <sup>82</sup>Se, <sup>85</sup>Rb, <sup>88</sup>Sr, <sup>111</sup>Cd, <sup>118</sup>Sn,



<sup>121</sup>Sb, <sup>133</sup>Cs, <sup>137</sup>Ba, <sup>208</sup>Pb ve <sup>238</sup>U) analiz işlemi gerçekleştirildi. Her çalışma seti içerisinde toprak numunesi olmayan kör örnek ve sertifikalı referans toprak numunesinin de analizi gerçekleştirildi. Yöntemin performansını değerlendirmek üzere, 10 farklı kör örnek analiz edilerek her bir element için elde edilen standart sapmanın 3 ve 10 katı, sırasıyla tespit limiti (LOD) ve tayin limiti (LOQ) olarak belirlendi. Çekitleme etkinliğinin izlenmesi için toprak numunesine 20, 50 ve 100 ng/mL olmak üzere 3 farklı konsantrasyonda standart madde karışımı eklendi ve her bir konsantrasyon için 3 ayrı numune hazırlandı, elde edilen sonuçların gerçek değere yakınlığı % geri kazanım olarak hesaplanırken, her bir geri kazanım basamağının 3 tekrarından elde edilen bağıl standart sapma (%RSD) ise yöntemin tekrar edilebilirliğini değerlendirmek üzere kullanıldı. Toprak numunelerinin analizi sonrasında iki farklı otoyoldan alınan numunelere ait sonuçlar arasındaki fark student's t-test ile değerlendirildi (%95CI, <0.005).

Topraktaki bazı toksik inorganik elementler için, düzenleyici kurumlar tarafından izin verilen çok çeşitli aralıklarda sınır değerler belirlenmiş olup, çalışmadan elde edilen sonuçlar, Çizelge 3'te gösterilen bu değerlere göre ele alındı. Çizelgede yer alan 3 farklı kuruluşun toplam 12 element için belirlediği en düşük limitler dikkate alındı. Bu çizelgeye göre, Cr, Co,, As, Se,, Sn ve Ba için T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen, Ni için Dünya Sağlık Örgütü tarafından belirlenen ve Mn, Cu, Zn, Cd ve Pb için ise ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından belirlenen sınır değerler kullanıldı ([Toprak Kirliliğinin Kontrolü Ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, 2010](#); [Ogundele ve ark., 2015](#); [Yetimoğlu ve ark., 2007](#)).

Çizelge 3. Topraktaki inorganik elementler için belirlenen sınır değerleri (kuru ağırlık) (mg/kg)

İnorganik Element	T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı *	Dünya Sağlık Örgütü**	ABD Çevre Koruma Ajansı***
Cr	235	-	-
Mn	-	-	600
Co	23	-	-
Ni	1564	35	40
Cu	3129	36	30
Zn	23464	50	50
As	0.4	-	-
Se	391	-	-
Cd	70	0.8	0.06
Sn	46929	-	-
Ba	15643	-	-
Pb	400	85	10

(\*Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, 2010; \*\*Ogundele ve ark., 2015; \*\*\*Yetimoğlu ve ark., 2007).

### Kirlilik faktörünün (CF) hesaplanması

Analiz edilen toprak numunelerindeki her bir elementin kirlilik faktörü (CF) hesaplandı. Kirlilik faktörü toprak numunesinde bulunan inorganik elementin konsantrasyon değerinin, arka plan değerlerine bölünmesiyle elde edildi (Eşitlik 1). Arka plan değeri (kirlenmemiş referans element değeri), toprağın doğal yapısından gelebilecek element içeriklerinin değerini ifade etmektedir ve bu değer ülkeler arasında farklılık gösterebilmektedir ([Chabukdhara ve Nema, 2012](#); [Jiang ve ark., 2017](#); [Faisal ve ark., 2021](#); [Yesilkanat ve Kobya, 2021](#)). İnorganik elementler için kullanılan arka plan değerleri bu çalışmada, Şen ve Yakupoğlu'nun, 2022 yılında sunulan çalışmalarında kullandıkları değerler ile aynıdır ve; Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Se ve Pb için sırasıyla 90, 850, 68, 95, 50, 13, 0.6 ve 70 mg/kg'dır ([Şen ve Yakupoğlu, 2022](#)).

$$CF = \frac{C_{\text{inorganik element}}}{C_{\text{arka plan değeri}}} \quad (1)$$

Elde edilen CF değerleri 4 kategoride değerlendirilmekte olup; CF < 1, düşük düzey; 1 < CF < 3, orta düzey; 3 < CF < 6, önemli düzey ve CF > 6, çok yüksek düzey kirlenmeyi ifade etmektedir ([Hakanson, 1980](#); [Şen ve Yakupoğlu, 2022](#)).

## Jeo-birikim indeksinin (I<sub>geo</sub>) hesaplanması

Toprak numunelerindeki inorganik kirliliği belirlemek için kullanılan jeo-birikim indeksi (I<sub>geo</sub>) aşağıdaki gibi hesaplandı (Eşitlik 2) (Muller, 1969);

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right) \quad (2)$$

Jeo-birikim indeksi formülündeki C<sub>n</sub>, toprak numunelerindeki inorganik elementlerin konsantrasyonunu, B<sub>n</sub> ise yine aynı elementler için CF hesaplanmasında açıklandığı gibi, jeokimyasal arka plan değerlerini temsil etmektedir ve CF hesaplanmasında kullanılan arka plan değerleri ile aynı değerlerdir. Sabit değer (1.5) ise antropojenik etki katsayısıdır. Jeo-birikim indeksi yedi sınıfa ayrılmaktadır (Yeşilkanat ve Kobyay, 2021);

Sınıf I: Kirlenmemiş (I<sub>geo</sub> ≤ 0),

Sınıf II: Kirlenmemiş-orta derecede kirlenmiş (0 < I<sub>geo</sub> ≤ 1),

Sınıf III: Orta derecede kirlenmiş (1 < I<sub>geo</sub> ≤ 2),

Sınıf IV: Orta derecede-çok kirlenmiş (2 < I<sub>geo</sub> ≤ 3),

Sınıf V: Çok kirlenmiş (3 < I<sub>geo</sub> ≤ 4),

Sınıf VI: Çok- aşırı kirlenmiş (4 < I<sub>geo</sub> ≤ 5) ve

Sınıf VII: Aşırı kirlenmiş (5 < I<sub>geo</sub>)

## Bulgular ve Tartışma

### Yöntemin performans değerlendirmesi

Yirmi dört element arasından kantitatif analizi yapılan 19 inorganik elementin tümü için belirlenen çalışma aralığı, kalibrasyon eğrisinin korelasyon katsayısı (R<sup>2</sup>), % geri kazanım, %RSD, LOD ve LOQ değerleri Çizelge 4'de gösterildiği gibidir. Elde edilen kalibrasyon eğrilerinin tümünde yüksek korelasyon katsayıları elde edildi (R<sup>2</sup> ≥ 0.997). Üç farklı konsantrasyonda yürütülen geri kazanım çalışmalarının ise kabul edilebilir sınırlarda (%70.00-114.95) olduğu, tekrar edilebilirliğin ise ≤6.32 %RSD ile yüksek performansta olduğu görüldü. Kör örneklerin analizinden elde edilen bulgular, çekitleme sırasında herhangi bir girişimin olmadığını gösterdi. Sertifikalı referans toprak materyali kullanılarak değerlendirilen yöntemin doğruluğu Çizelge 1'deki sertifika değerlerine göre hesaplandı ve kesinlik değeri %89.69-99.32 arasında bulundu. Bu bulgular ışığında otoyol kenarından toplanan toprak numunelerinin analizi için geliştirilen çekitleme ve ölçme yöntemlerinin geçerli ve güvenilir olduğu kanaatine varıldı.

### Toprak numunelerindeki inorganik element konsantrasyonları

İki farklı otoyolun farklı bölgelerinden 3'er tekrarlı toplanan 36 toprak numunesindeki 24 inorganik element konsantrasyonları ve bu iki otoyolun sonuçlarının student's t-test ile karşılaştırılması sonucu elde edilen p değerleri, Çizelge 5'te gösterilmektedir. Otoyol kenarının 0, 10 ve 25 metre uzaklığından alınan toprak numunelerinin aralarında anlamlı bir fark bulunmadığından üç farklı uzaklıktaki numunelerin ve farklı mevkilerdeki sonuçların ortalama değerleri sunuldu.

Toprak numunelerinde analiz edilen 24 element arasından V, Se, Sn, Sb, ve Cs konsantrasyonlarının tümünün her iki otoyol için de tayin limitlerinin altında kaldığı görüldü. Öte yandan her iki otoyola ait toprak numunelerinin içerdiği ortalama inorganik element konsantrasyonlarına bakıldığında, E80 otoyolunun beklendiği üzere, daha uzun yıllardır kullanılmakta olan ve trafik yoğunluğu fazla olan bir otoyol olarak KMO'ya göre daha fazla inorganik yük içerdiği görüldü. İki otoyoldan alınan 18'er numunenin ortalama değerlerinin karşılaştırılması sonucunda; Li, Mg, K, Ca, Cr, Ni, As, Sr ve Ba elementleri arasında anlamlı fark bulundu (p<0,05). Her ne kadar Zn ve Pb elementlerinin ortalama konsantrasyonu E80 otoyolunda daha yüksek bulunsay da KMO ile aralarında anlamlı bir fark bulunamadı (p>0.05).

Çizelge 4. Yöntemin performans parametreleri (çalışma aralığı, korelasyon katsayısı (R<sup>2</sup>), LOD ve LOQ değerleri, % geri kazanım, %RSD).

Element	Çalışma Aralığı (ng/mL)	R <sup>2</sup>	LOD (ng/mL)	LOQ (ng/mL)	Geri Kazanım (%) ±%RSD (n=3)		
					20.00 (ng/mL)	50.00 (ng/mL)	100.00 (ng/mL)
<sup>7</sup> Li	0.1 - 150	>0.999	0.03	0.10	84.08 ±2.38	78.21 ±4.18	74.47 ±2.75
<sup>9</sup> Be	0.1 - 100	>0.999	0.03	0.10	78.48 ±2.83	74.27 ±3.28	78.68 ±1.48
<sup>24</sup> Mg	20 - 300	>0.999	0.88	2.92	-	-	-
<sup>27</sup> Al	7.5 - 150	>0.999	2.29	7.64	-	-	-
<sup>39</sup> K				Yarı Kantitatif			
<sup>44</sup> Ca	20 - 400	>0.997	3.94	13.40	-	-	-
<sup>51</sup> V				Yarı Kantitatif			
<sup>52</sup> Cr	0.1 - 150	>0.999	0.03	0.10	-	-	-
<sup>55</sup> Mn	0.5 - 150	>0.999	0.12	0.39	114.95 ±3.02	100.05±19.59	81.03 ±5.00
<sup>59</sup> Co	0.1 - 150	>0.999	0.03	0.10	79.95 ±2.19	74.77 ±3.65	78.44 ±1.39
<sup>60</sup> Ni	0.2 - 150	>0.999	0.07	0.23	78.80 ±2.64	72.43 ±3.45	76.21 ±1.49
<sup>65</sup> Cu	0.5 - 150	>0.999	0.13	0.42	71.25 ±2.44	70.00 ±3.87	75.43 ±1.36
<sup>66</sup> Zn	20 - 400	>0.999	0.21	0.70	74.20 ±3.53	78.95 ±4.29	74.20 ± 3.80
<sup>75</sup> As	0.1 - 150	>0.999	0.02	0.08	93.19±5.12	89.97±4.99	87.34±5.50
<sup>82</sup> Se	0.1 - 150	>0.999	0.04	0.14	-	-	-
<sup>85</sup> Rb				Yarı Kantitatif			
<sup>88</sup> Sr	0.2 - 100	>0.999	0.05	0.15	81.92 ±4.46	76.31 ±4.48	70.90 ±1.98
<sup>111</sup> Cd	0.1 - 150	>0.999	0.003	0.01	83.05±4.44	87.97±3.37	79.19±2.39
<sup>118</sup> Sn				Yarı Kantitatif			
<sup>121</sup> Sb	0.1 - 150	>0.999	0.02	0.08	-	-	-
<sup>133</sup> Cs				Yarı Kantitatif			
<sup>137</sup> Ba	0.1 - 150	>0.999	0.02	0.06	-	-	-
<sup>208</sup> Pb	0.1 - 50	>0.999	0.01	0.03	-	-	-
<sup>238</sup> U	0.1 - 20	>0.999	0.04	0.13	70.07 ±1.82	74.01 ±6.32	77.87 ±2.41

Elde edilen bulgular Çizelge 3'teki değerler ile karşılaştırıldığında, 12 inorganik element içerisinde 3 element (Zn, Cd ve Pb) ABD, Çevre Koruma Ajansı tarafından belirlenen toprakta bulunması gereken sınır değerlerin üzerinde olduğu ve bu değerlerin E80 otoyolundan alınan 18 numune arasında olduğu ve numune dağılımına göre değerlendirildiğinde, Zn ve Pb için 3 numunede (%16.66), Cd için 15 numunede (%83.33) sınır değeri aştığı görüldü (Yetimoğlu ve ark., 2007). Çarpışma bariyerleri, yol işaretleri ve lamba direkleri gibi galvanizli metal yapıların korozyonu yol kenarı topraklarında Zn ve Cd elementlerinin varlığına katkıda bulunabilmektedir (Nagehban, 2015; Gope ve ark., 2017). Zn elementi günlük hayatımızın her alanında bulunan bir eser elementtir ve insanların, mikroorganizmaların, bitkilerin ve hayvanların büyümesi ve gelişmesi için gereklidir. Çinko vücutta depolanmayan ancak yüksek dozda maruz kalınması durumunda emilimin azalmasına ve atılımın artmasına neden olan bir temel elementtir. Ayrıca, canlı organizmalar için neredeyse toksik olmayan fakat çok fazla maruziyette kronik ve akut zehirlenmelere neden olduğu bilinen bir elementtir (Stefanidou ve ark., 2006). Önemli bir toksik element olan kadmiyuma uzun süre maruz kalınması, hedef organ böbrek olmak üzere, çeşitli organları etkilemektedir. Kurşun yüksekliğinin ise, büyük ölçüde geçmişte benzinde katkı maddesi olarak kullanımına bağlı olduğu, ayrıca araba yağlama yağı ve greslerinden, lastik yataklarının aşınması ve yırtılmasından, baskı ve grafik atıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kurşunun insanlar üzerindeki olumsuz etkilerine dair bilgiler birçok çalışma ile kanıtlanmış olup, sinir, üreme ve boşaltım sistemlerine zarar verebildiği, özellikle çocuklarda nöro-gelişimsel sorunlara da yol açtığı bilinmektedir (Faiz ve ark., 2009; Mercan 2015).

Çizelge 5. Toprak örneklerindeki element konsantrasyonları ve otoyollara göre karşılaştırması (mg/kg)

Element	E80 (n=18)		KMO (n=18)		p (%95CI)
	Ort (± STD)	min-max	Ort (± STD)	min-max	
<sup>7</sup> Li	0.32 (± 0.07)	0.21-0.38	0.09 (±0.07)	0.05-0.22	<b>0.000</b>
<sup>9</sup> Be	0.13 (± 0.02)	0.10-0.16	0.19 (±0.07)	0.10-0.32	0.101
<sup>24</sup> Mg	837.10 (± 510.80)	407.95-1778.00	281.90 (±181.18)	161.15-642.71	<b>0.044</b>
<sup>27</sup> Al	80.60 (± 5.00)	75.57-89.32	86.84 (±11.29)	75.33-105.43	0.256
<sup>39</sup> K	266.95 (± 75.88)	165.56-362.43	75.28 (±18.00)	55.97-97.92	<b>0.001</b>
<sup>44</sup> Ca	42192.00 (± 26031.60)	10313.3378186.67	2088.95 (±3584.90)	322.219397.20	<b>0.013</b>
<sup>51</sup> V	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	
<sup>52</sup> Cr	1.04 (± 0.48)	0.30-1.47	0.17 (±0.18)	<LOQ-0.53	<b>0.005</b>
<sup>55</sup> Mn	113.95 (± 52.57)	49.93-201.53	61.47 (±24.94)	23.38-91.67	0.062
<sup>59</sup> Co	1.43 (± 0.41)	0.84-1.96	1.25 (±0.34)	0.88-1.87	0.424
<sup>60</sup> Ni	3.83 (± 0.90)	2.66-5.08	1.05 (±0.40)	0.57-1.77	<b>0.000</b>
<sup>65</sup> Cu	3.95 (± 6.32)	0.42-16.67	2.08 (±3.51)	0.51-9.25	0.545
<sup>66</sup> Zn	27.30 (± 43.35)	2.01-113.04	5.75 (±9.44)	1.09-24.99	0.283
<sup>75</sup> As	0.36 (± 0.12)	0.28-0.61	<LOQ	<LOQ	<b>0.003</b>
<sup>82</sup> Se	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
<sup>85</sup> Rb	0.17 (± 0.03)	0.13-0.21	0.14 (±0.03)	0.10-0.18	0.072
<sup>88</sup> Sr	122.43 (± 82.91)	37.48-227.73	7.41 (±7.84)	2.03-23.21	<b>0.019</b>
<sup>111</sup> Cd	0.21 (± 0.20)	0.05-0.59	0.01 (±0.01)	<LOQ-0.02	0.056
<sup>118</sup> Sn	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
<sup>121</sup> Sb	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
<sup>133</sup> Cs	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	-
<sup>137</sup> Ba	50.13 (± 10.13)	3.84-65.87	22.58 (±7.14)	13.01-29.79	<b>0.000</b>
<sup>208</sup> Pb	3.97 (± 5.33)	0.99-14.77	0.51 (±0.33)	0.23-1.10	0.173
<sup>238</sup> U	0.26 (± 0.12)	<LOQ-0.45	0.16(±0.04)	<LOQ-0.24	0.093

Ort: ortalama, STD: standart sapma, min.: minimum, max: maksimum

Çizelge 6'da, toprak numunelerindeki inorganik elementler için gözlemlenen konsantrasyonlar ve rapor edilen benzer çalışmaların karşılaştırması sunulmuştur. Tüm çalışmalarda ortak olarak Ni, Cu, Zn ve Pb elementleri araştırılmış olup çizelgede yer alan araştırmalarda 24 elementin birlikte incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmamız bu bağlamda yapılmış en kapsamlı yol kenarı toprak araştırmasıdır. İnorganik element konsantrasyonlarını bildiren çalışmalar ile karşılaştırıldığında, çalışmamızda Ni (2.44 mg/kg) ve Pb (2.24 mg/kg) konsantrasyonları daha düşük bulunmuştur. Bu çalışmada Cu (3.01 mg/kg) ve Zn (16.52 mg/kg) konsantrasyonları, [Al-Khasman \(2004\)](#)'ın sonuçlarına göre (Cu, 0.85 mg/kg ve Zn, 4.95 mg/kg) yüksek bulunurken, diğer tüm çalışmalara göre düşük bulunmuştur ([Al-Khasman, 2004](#)). Li, Be, Mg ve Al konsantrasyonları yalnızca bu çalışmada ve Rasmussen ve ark., (2001) tarafından yürütülen çalışmada bildirilmiş olup, elde edilen değerler sırasıyla 0.20 mg/kg, 0.16 mg/kg, 559.50 mg/kg ve 83.72 mg/kg iken; [Rasmussen ve ark., \(2001\)](#)'nın çalışmasında özellikle Al için daha yüksek değerler bulunmuştur ([Rasmussen ve ark., 2001](#)). K ve Ca elementlerinin konsantrasyonlarını bu çalışma dışında bildiren iki çalışmaya bakıldığında, her iki çalışmada da K ve Ca konsantrasyonları oldukça yüksek bulunmuştur ki, yüksek bulunan her iki element de toprağın doğal yapıtaşlarından sayılmakta ve çevre toksikolojisi açısından risk teşkil etmeyen parametrelerdir ([Rasmussen ve ark., 2001](#); [Coşkun ve ark., 2006](#)). V, Se, Sn, Sb ve Cs elementleri çalışmamızda tayin limitinin altında kalırken, diğer çalışmalarda tayin edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Ayrıca Cr, Mn, Co, As, Rb, Sr, Cd, Ba ve U elementlerinin konsantrasyon değerleri, bu elementleri bildirilen çalışmalardan daha düşük bulunmuştur. Benzer çalışmaların dünyanın farklı coğrafik bölgelerinde yürütüldüğü ve farklı arka plan değerleri kullanılarak hesaplandığı akılda tutulması gereken bir konudur. Dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da karşılaştırılan çalışmalarda toprağın çekitleme



yöntemlerinin farklı olmasıdır. Çalışmamızda inorganik asitlerle yapılan güçlü çökeltme yöntemleri tercih edilmemiş olup, organik bir asit olan asetik asit çökeltme yöntemi tercih edilmiştir. Bu nedenlerle her bir çalışmanın kendi içinde değerlendirilmesi gerekmekte, yapılan karşılaştırmaların ilgili coğrafik bölgelerin toprak kirliliğinin bir sıralaması olmadığı düşünülmektedir.

Çizelge 6. Toprak numunelerindeki inorganik element içeriğinin ortalama değerini bildiren çalışmaların karşılaştırılması (mg/kg)

Element	Bu çalışma (n=36)	Al- Khasman, (2004) (n=32)	Rasmussen ve ark., (2001) (n=50)	Adimalla, (2020) (n=40)	Baltas ve ark., (2020) (n=88)	Liang ve ark., (2019) (n=180)	Coşkun ve ark., (2006) (n=73)	Wu ve ark., (2018) (n=70)
<sup>7</sup> Li	0.20		11.30					
<sup>9</sup> Be	0.16		1.40					
<sup>24</sup> Mg	559.50		8937.00					
<sup>27</sup> Al	83.72		55841.00					
<sup>39</sup> K	171.11		18035.00				20100.00	
<sup>44</sup> Ca	22140.47		26978.00				30700.00	
<sup>51</sup> V	<LOQ		46.80				78.00	83.10
<sup>52</sup> Cr	0.60		44.80	244.10	194.73	54.80	173.00	93.29
<sup>55</sup> Mn	87.71		525.30				600.00	
<sup>59</sup> Co	1.34		8.36			8.60	11.00	11.59
<sup>60</sup> Ni	2.44	3.15	16.30	20.22	85.02	24.20	50.00	54.73
<sup>65</sup> Cu	3.01	0.85	13.19	63.63	43.19	44.10	20.00	40.74
<sup>66</sup> Zn	16.52	4.95	113.70	58.80	65.10	153.00	45.00	145.64
<sup>75</sup> As	0.22		3.00	4.39	5.66		8.00	
<sup>82</sup> Se	<LOQ		0.70				10.00	
<sup>85</sup> Rb	0.16		52.00					
<sup>88</sup> Sr	64.92		360.00				178.00	
<sup>111</sup> Cd	0.11		0.30	1.07			0.20	0.68
<sup>118</sup> Sn	<LOQ							7.26
<sup>121</sup> Sb	<LOQ		0.36				0.90	2.35
<sup>133</sup> Cs	<LOQ						4.00	
<sup>137</sup> Ba	36.36		766.00				550.00	
<sup>208</sup> Pb	2.24	5.35	64.69	24.73	17.01	57.40	33.00	72.49
<sup>238</sup> U	0.21		1.17				2.60	

### Kirlilik faktörü (CF) ve jeo-birikim indeksi (I<sub>geo</sub>)

Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn ve Pb elementleri için CF ve I<sub>geo</sub> değerleri her bir örnekleme noktası için hesaplandı ve Çizelge 7'de gösterildi, Se elementi, konsantrasyonu tüm numunelerde tayin limitinin altında bulunduğu için,, geri kalan elementler ise belirlenmiş arka plan değerleri olmadığı için CF ve I<sub>geo</sub> hesaplamalarına dahil edilmedi. Hem E80 hem de KMO için Zn elementi hariç CF değerinin 1'den düşük (düşük düzeyde kirlenme) olduğu görüldü. İki numunede Zn için CF değeri 1 ve 3 arasında (orta düzeyde kirlenme) bulunurken, 1 numunede 6'dan büyük (çok yüksek düzeyde kirlenme) olduğu görüldü. Yüksek CF değerine sahip olan numunelerin otoyola en yakından alınan numuneler (0 metre) olduğu gözlemlendi. I<sub>geo</sub> indeksi hesaplaması sonucunda tüm numuneler Mn ve Zn elementleri için Sınıf II kategorisinde değerlendirildi. Diğer elementler için otoyol kenarına yakın numuneler Sınıf II (Kirlenmemiş-orta derecede kirlenmiş) derecesinde bulunurken, otoyol kenarından uzaklaştıkça toprak numunelerinin sonuçlarının Sınıf I'e dahil olduğu görüldü. Her iki otoyol için de I<sub>geo</sub> indeksinin kirlenmemiş-orta derecede kirlenmiş sınıfında olduğu görüldü. Chien-Cheng Jung ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da belirtildiği gibi trafik emisyonu ve dış ortamdaki yağ yanmasının, Mn ve Zn için başlıca kirlilik kaynakları olduğu bu çalışma ile de desteklendi (Jung ve ark., 2021).

Çizelge 7. Otoyol mevki ve mesafesine göre toprak örneklerinin CF ve I<sub>geo</sub> değerleri

Otoyol	Mevki	Mesafe	İnorganik Kirlilik	Element						
				<sup>52</sup> Cr	<sup>55</sup> Mn	<sup>59</sup> Co	<sup>60</sup> Ni	<sup>65</sup> Cu	<sup>66</sup> Zn	<sup>208</sup> Pb
E80	Mahmutbey	0 m	CF	0.015	0.126	0.026	0.042	0.067	<b>2.342</b>	0.040
			I <sub>geo</sub>	0.004	0.005	0.008	0.014	0.023	0.253	0.014
		10 m	CF	0.006	0.086	0.018	0.031	0.029	0.895	0.019
			I <sub>geo</sub>	0.000	0.005	0.003	0.011	0.007	0.182	0.004
		25 m	CF	0.003	0.059	0.012	0.028	0.008	0.229	0.014
			I <sub>geo</sub>	0.000	0.004	0.000	0.010	0.000	0.081	0.000
	Bahçeşehir	0 m	CF	0.016	0.237	0.029	0.053	0.333	<b>8.695</b>	0.211
			I <sub>geo</sub>	0.004	0.006	0.010	0.016	0.054	0.350	0.037
		10 m	CF	0.013	0.155	0.018	0.047	0.018	0.283	0.023
			I <sub>geo</sub>	0.002	0.006	0.003	0.015	0.000	0.096	0.007
		25 m	CF	0.014	0.141	0.022	0.040	0.018	0.155	0.033
			I <sub>geo</sub>	0.003	0.005	0.006	0.013	0.000	0.052	0.012
KMO	Arnavutköy	0 m	CF	0.006	0.108	0.028	0.019	0.185	<b>1.922</b>	0.016
			I <sub>geo</sub>	0.000	0.005	0.009	0.006	0.043	0.238	0.001
		10 m	CF	0.002	0.069	0.019	0.010	0.016	0.167	0.006
			I <sub>geo</sub>	0.000	0.005	0.004	0.000	0.000	0.057	0.000
		25 m	CF	-	0.028	0.018	0.009	0.012	0.191	0.003
			I <sub>geo</sub>	-	0.004	0.003	0.000	0.000	0.067	0.000
	Odayeri	0 m	CF	-	0.084	0.015	0.010	0.013	0.119	0.004
			I <sub>geo</sub>	-	0.005	0.000	0.000	0.000	0.032	0.000
		10 m	CF	-	0.094	0.017	0.012	0.014	0.172	0.004
			I <sub>geo</sub>	-	0.005	0.002	0.001	0.000	0.059	0.000
		25 m	CF	-	0.052	0.013	0.006	0.010	0.084	0.009
			I <sub>geo</sub>	-	0.004	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000

Elde edilen bulgular ayrıca, trafiğin sokak tozundaki metallerin dağılımını ve birikimini doğrudan etkilediğini gösteren çalışmalar ile de uyumlu bulundu. Şehir merkezlerindeki ağır metal kirliliğinin birincil kaynağının araçlardan kaynaklanan emisyonlar olduğuna dair çalışmalar (Cd hariç), Ba, Cu, Mn, Pb, Cr ve Zn elementlerinin toprağın içeriğinde bulunmanın yanı sıra trafik kaynaklı olduğunu göstermiş olup, bunu destekler biçimde, bizim çalışmamızda da inorganik element konsantrasyonları otoyolun kullanım yılı arttıkça daha yüksek bulundu (Lima ve ark. 2023). Otoyolların her ikisinde de görüldüğü üzere, kullanılan arak plan değerlerinden ve yetkili kurumlar tarafından belirlenen sınır değerlerden bağımsız bir şekilde, otoyoldan uzaklaşıldıkça CF değerlerinin azaldığı, en yüksek kirliliğin ise otoyola en yakın mesafelerde olduğu görüldü. Bu da toprağın içerdiği gerek toksik gerek esansiyel elementlerin trafik yoğunluğuna bağlı olarak yıllar içerisinde arttığını gösterdi.

## Sonuç

İstanbul ilinin E80 Tem Otoyolu ve Kuzey Marmara otoyolunda, otoyola belirli mesafelerde bulunan topraklardan (n=36) elde edilen inorganik element konsantrasyon değerleri, kirlilik faktörü ve jeo-birikim indeksi değerlendirmesi yapıldı. Numune toplanan her iki otoyolun karşılaştırması yapıldığında, Kuzey Marmara Otoyolundan alınan toprak numunelerinin, otoyolun daha kısa zamandır kullanılıyor olmasından kaynaklı olarak, tüm inorganik element konsantrasyonlarının E80 otoyoluna göre daha düşük olduğu görüldü. Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Sn, Ba, Pb ve U elementleri, T.C Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Dünya Sağlık Örgütü ve ABD Çevre Koruma Ajansı'nın belirlediği sınır değerler ile karşılaştırıldığında ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından belirlenen sınır değerleri göz önüne alınarak, E80 otoyolunda, Pb ve Zn elementlerinin yol kenarına yakın bölgede (0 ve 10 metre) sınır değeri aşarken, Cd elementinin yol kenarına yakın veya uzak tüm bölgelerinde sınır değeri aştığı ve trafik yoğunluğuna bağlı

olarak topraktaki toplam yükün arttığı tespit edildi. Değerlendirme yapılırken her element için minimum sınır değeri kullanıldı bunun sonucunda Pb, Zn ve Cd elementleri T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından belirlenen sınır değerleri aşmadığı, fakat ABD Çevre Koruma Ajansı tarafından belirlenen değerleri aştığı görüldü. Hesaplanan kirlilik faktörü sonuçlarına göre, her iki otoyol için de yol kenarına yakın mesafelerde iki numune için Zn elementinin orta düzey ( $1 < CF < 3$ ) ve bir numune için çok yüksek düzeyde ( $CF > 6$ ) kirlenme meydana getirdiğini gösterdi. Jeo-birikim indeksi sonuçlarına göre ise Mn ve Zn elementlerinin tüm otoyollar için orta derecede kirlilik ( $0 < Igeo < 1$ ) yarattığı görüldü. Toplam 24 element konsantrasyonunun tek bir analizde eşzamanlı şekilde belirlendiği ilk çalışma niteliği taşıyan bu araştırmada, trafik yoğunluğu ve otoyolun kullanım süresi arttıkça ağır metal yükünün de artacağı, bu nedenle gerek halk sağlığı gerekse çevre toksikolojisi açısından olumsuz etkiler yaratacağı düşünülmektedir. Ayrıca ICP-MS sistemi ile yürütülen bu çalışma için geliştirilen analiz yöntemi, doğruluğu, kesinliği, tespit ve tayin limitleri belirlenerek geçerli kılınmış olup, gerek çevre toksikolojisi ve halk sağlığı çalışmalarında gerekse jeoloji, adli bilimler vb. alanlarda da kullanılabilir nitelikte bir yöntem olduğu kanaatine varıldı.

## Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından, FYL-2018-30917 numaralı proje ile desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Abrahams PW, 2002. Soils: their implications to human health. *Science of the Total Environment*. 291(1-3): 1-32.
- Adimalla N, 2020. Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution. *Environmental Geochemistry and Health*. 42(1): 59-75.
- Al-Khashman OA, 2004. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmospheric environment*. 38(39): 6803-6812.
- Baltas H, Sirin M, Gökbayrak E, Özcelik AE, 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.
- Barbieri MJGG, 2016. The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *J Geol Geophys*. 5(1): 1-4.
- Chabukdhara M, Nema AK, 2012. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: a chemometric and geochemical approach. *Chemosphere*, 87(8), 945-953.
- Coşkun M, Steinnes E, Frontasyeva MV, Sjobakk T E, Demkina S, 2006. Heavy metal pollution of surface soil in the Thrace region, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*. 119: 545-556.
- Çağlarırnak N, Hepçimen AZ, 2010. Ağır Metal Toprak Kirliliğinin Gıda Zinciri ve İnsan Sağlığına Etkisi. *Akademik Gıda*. 8(2): 31-35.
- El-Zeiny AM, Abd El-Hamid HT, 2022. Environmental and human risk assessment of heavy metals at northern Nile Delta region using geostatistical analyses. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 25(1): 21-35.
- European Commission, 2007, Joint Research Centre, Certified reference materials catalogue: BCR-700 Organic-Rich Soil (extractable elements). Available from URL: <https://crm.jrc.ec.europa.eu/p/40455/40459/By-kind-of-material/Soils-sludges-sediment-dust/BCR-700-ORGANIC-RICH-SOIL-extractable-elements/BCR-700>
- Faisal M, Wu Z, Wang H, Hussain Z, Azam MI, 2021. Human health risk assessment of heavy metals in the urban road dust of Zhengzhou metropolis, China. *Atmosphere*, 12(9), 1213.
- Faiz Y, Tufail M, Javed MT, Chaudhry MM, 2009. Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along islamabad expressway, Pakistan. *Microchemical Journal*. 92(2): 186-192.
- Gope M, Masto RE, George J, Hoque RR, Balachandran S, 2017. Bioavailability and health risk of some potentially toxic elements (Cd, Cu, Pb and Zn) in street dust of Asansol, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 138: 231-241.
- Guney M, Onay TT, Copty NK, 2010. Impact of overland traffic on heavy metal levels in highway dust and soils of Istanbul, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*. 164: 101-110.
- Hakanson L, 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Resources*. 14: 975-1001.

- Jiang Y, Chao S, Liu J, Yang Y, Chen Y, Zhang A, Cao H, 2017. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. *Chemosphere*, 168, 1658-1668.
- Jung CC, Wang JH, Chang WH, Chen CY, 2021. Metal concentration, source, and health risk assessment of PM<sub>2.5</sub> in children's bedrooms: Rural versus urban areas. *Atmospheric Environment*, 264, 118701.
- Kamani H, Ashrafi SD, Isazadeh S, Jaafari J, Hoseini M, Mostafapour FK, Mahvi AH, 2015. Heavy metal contamination in street dusts with various land uses in Zahedan, Iran. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 94: 382-386.
- Kara EE, Kara E, 2018. Toprakta Ağır Metal Kirliliğinin İnsan Sağlığına Etkileri ve Çözüm Önerileri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*. 11(1): 56-62.
- Karaca A, Mert M, 2012. Adli toprak bilimi. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*. 1 (1): 40-46.
- Li X, Poon CS, Liu PS, 2001. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied geochemistry*. 16(11-12): 1361-1368.
- Liang SY, Cui JL, Bi XY, Luo XS, Li XD, 2019. Deciphering source contributions of trace metal contamination in urban soil, road dust, and foliar dust of Guangzhou, southern China. *Science of The Total Environment*. 695: 133596.
- Lima, L. H. V., do Nascimento, C. W. A., da Silva, F. B. V., & Araújo, P. R. M. (2023). Baseline concentrations, source apportionment, and probabilistic risk assessment of heavy metals in urban street dust in Northeast Brazil. *Science of The Total Environment*, 858, 159750.
- Masoudi SN, Sepanlou MG, Bahmanyar MA, 2012. Distribution of lead, cadmium, copper and zinc in roadside soil of Sari-Ghaemshahr road, Iran. *Afr J Agric Res*. 7(2): 198-204.
- Mercan S, Ellez SZ, Türkmen Z, Yayla M, Cengiz S, 2015. Quantitative lead determination in coating paint on children's outwear by LA-ICP-MS: A practical calibration strategy for solid samples. *Talanta*. 132: 222-227.
- Muller, 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.
- Negahban S, Mokarram M, 2021. Potential ecological risk assessment of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in roadside soils. *Earth and space science*. 8(4): e2020EA001120.
- Ogundele DT, Adio AA, Oludele OE, 2015. Heavy metal concentrations in plants and soil along heavy traffic roads in North Central Nigeria. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*: 5(6): 334.
- Rasmussen PE, Subramanian KS, Jessiman BJ, 2001. A multi-element profile of house dust in relation to exterior dust and soils in the city of Ottawa, Canada. *Science of The Total Environment*. 267(1-3): 125-140.
- Saito, H., Sutton, M., Zhao, P., Lee, S. D., & Magnuson, M. (2020). Review of technologies for preventing secondary transport of soluble and particulate radiological contamination from roadways, roadside vegetation, and adjacent soils. *Environmental Advances*, 1, 100003.
- Sezgin N, Ozcan HK, Demir G, Nemlioglu S, Bayat C, 2004. Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway. *Environment International*. 29(7): 979-985.
- Shahid M, Nadeem M, Bakhat HF, 2020. Environmental toxicology and associated human health risks. *Environmental Science and Pollution Research*. 27: 39671-39675.
- Shi J, Wang H, Xu J, Wu J, Liu X, Zhu H, Yu C, 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology*. 52: 1-10.
- Stefanidou M, Maravelias C, Dona A, Spiliopoulou C, 2006. Zinc: a multipurpose trace element. *Archives of toxicology*. 80: 1-9.
- Şen G, Yakupoğlu T, 2022. Moralli Deresi Sisteminin Akarsu-Göl Çökellerindeki Ağır Metallerin Ekolojik ve Çevresel Risk Değerlendirmesi, Tuşba, Van, Türkiye. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 27(1): 14-29.
- Toprak Kirliliğinin Kontrolü ve Noktasal Kaynaklı Kirlenmiş Sahalara Dair Yönetmelik, 08.06.2010. Resmi Gazete. URL: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/06/20100608-3.htm>
- Wu J, Lu J, Li L, Min X, Luo Y, 2018. Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chemosphere*. 201: 234-242.
- Yan X, Zhang F, Gao D, Zeng C, Xiang W, Zhang M, 2013. Accumulations of heavy metals in roadside soils close to Zhaling, Eling and Nam Co Lakes in the Tibetan Plateau. *International journal of environmental research and public health*. 10(6): 2384-2400.
- Yaylalı-Abanuz G, 2019. Application of multivariate statistics in the source identification of heavy-metal pollution in roadside soils of Bursa, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*. 12: 1-14.



- Yesilkanat CM, Kobyay Y, 2021. Spatial characteristics of ecological and health risks of toxic heavy metal pollution from road dust in the Black Sea coast of Turkey. *Geoderma Regional*. 25: e00388.
- Yetimoğlu EK, Ercan Ö, Tosyali K, 2007. Heavy Metal Contamination in Street Dusts of Istanbul (Pendik to Levent) E-5 Highway. *Annali di Chimica: Journal of Analytical, Environmental and Cultural Heritage Chemistry*. 97(3-4): 227-235.
- Zhang F, Yan X, Zeng C, Zhang M, Shrestha S, Devkota LP, Yao T, 2012. Influence of traffic activity on heavy metal concentrations of roadside farmland soil in mountainous areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 9(5): 1715-1731.