



Characterization of wastewater from waste oil recovery plants and assessment of potential risks to human health

Volkan Pelitli*

TÜBİTAK MAM, The Vice Presidency of Climate and Life Sciences, Resource Efficiency and Clean Energy Research Group, 41470, Kocaeli, Türkiye

Highlights:

- Concentrations of metals (Cu, Hg, Fe, Cd, Pb and Cr), hydrocarbons, phenol, cyanide, COD, oil/grease and other pollutants were determined
- Both carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessments were calculated using hazard quotient (HQ) and cancer risk (RISK)
- Potential health risks posed cyanide in wastewater, HQ values were > 1 for adults (2.08) and children (17.5)

Keywords:

- Waste Oil Recovery Plants
- Health Risk Assessment
- Wastewater Characterization
- Public Health Risks

Article Info:

Research Article

Received: 20.11.2024

Accepted: 03.03.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1588441

Correspondence:

Author: Volkan Pelitli

e-mail:

volkan.pelitli@tubitak.gov.tr

phone: +90 262 677 2998

Graphical/Tabular Abstract

This study aimed to determine the carcinogenic and non-carcinogenic risks of metals and cyanide in treated and untreated wastewaters from waste oil recovery plants in Türkiye. In this cross-sectional study, 25 samples were collected from different plants between 2020 and 2024 according to standard methods. Health risk assessments for untreated wastewaters showed that children may be more exposed to cyanide and heavy metals than adults, with their daily doses being 8.75 and 1.66 times higher, respectively (Figure A).

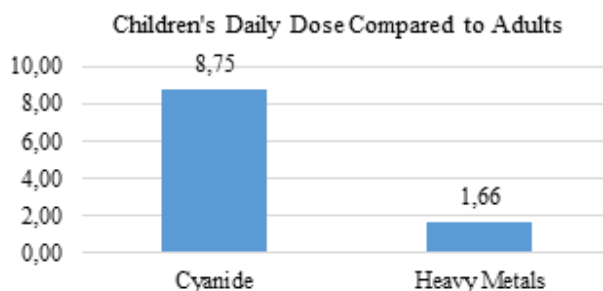


Figure A. Estimated daily intake ratio (child/adult)

Purpose: To characterize untreated and treated wastewaters from waste oil recovery facilities in Türkiye, assess health risks from pollutants such as cyanide and heavy metals, and compare these risks between adults and children.

Theory and Methods: The study evaluates untreated wastewaters from 25 waste oil recovery plants and treated wastewaters from 3 plants in Türkiye, focusing on pollutants such as heavy metals and organic compounds. Samples were collected over four years following standardized protocols and preserved to prevent degradation. The waters were analyzed for physicochemical parameters like pH, chemical oxygen demand (COD), ammonia, oil-grease, and various heavy metals using established laboratory methods, including ICP-OES for trace metal detection. Health risks were assessed based on EPA guidelines, calculating non-carcinogenic and carcinogenic risks through the Hazard Quotient (HQ) and Carcinogenic Risk Index (RISK).

Results: The wastewaters analysis identified high concentrations of cyanide ($914 \pm 1,864$ mg/L), heavy metals (0.51 ± 0.77 mg/L Cu, 0.003 ± 0.005 mg/L Hg, 2.5 ± 4.63 mg/L Fe, 0.068 ± 0.046 mg/L Cd, 0.088 ± 0.052 mg/L Pb and 0.085 ± 0.0524 mg/L Cr), and hydrocarbons ($24,252 \pm 106,187$ mg/L). Significant interactions were found between these pollutants. The health risk assessments showed no potential risks for treated wastewaters, but HQ reached 2.08 for adults and 17.5 for children for wastewaters. However, carcinogenic risks remained below acceptable limits. The potential contributor to potential risks has been identified as the accidental ingestion of wastewaters.

Conclusion: Evaluating the potential health risks of wastewater to humans is crucial. This study emphasizes the health risks associated with wastewater from waste oil recovery facilities, particularly for children. It highlights the need for effective treatment strategies and facility-specific discharge standards to safeguard public health and the environment. The approach outlined here could aid in developing guidance for recovery plants on risk assessment and support the implementation of appropriate wastewater management practices. However, the health risk assessments presented in this study are based on estimated calculations and should not be considered definitive; further comprehensive and long-term studies are needed to support these findings.



Atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksuların karakterizasyonu ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerin değerlendirilmesi

Volkan Pelitli*^{ID}

TÜBİTAK MAM, İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, Kaynak Verimliliği ve Temiz Enerji Araştırma Grubu, 41470, Kocaeli, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Metaller, hidrokarbonlar, fenol, siyanür, KOİ ve yağ/gres konsantrasyonları belirlenmiştir
- Kanserojen ve kanserojen olmayan sağlık riskleri hesaplanmıştır
- Siyanürün Tİ değerleri, yetişkinlerde 2,08, çocuklarda 17,5 ile 1'in üzerindedir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 20.11.2024

Kabul: 03.03.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1588441

Anahtar Kelimeler:

Atık yağ geri kazanım tesisleri, sağlık risk değerlendirmesi, atıksu karakterizasyonu, potansiyel halk sağlığı riskleri

ÖZ

Bu çalışmada, atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksuların kimyasal karakterizasyonu gerçekleştirilmiş; kirleticiler arasındaki ilişkiler değerlendirilmiş, arıtılmış ve arıtılmamış atıksuların potansiyel sağlık riskleri analiz edilmiştir. Atıksu analizlerinde ortalama değerler; amonyum için 367 mg/L, askıda katı madde için 361 mg/L, hidrokarbonlar için 24.252 mg/L, yağ ve gres için 26.736 mg/L, bakır için 0,51 mg/L, kurşun için 0,088 mg/L ve siyanür için 914 mg/L olarak belirlenmiştir. Korelasyon analizleri, hidrokarbonlar ile yağ-gres arasında çok güçlü bir ilişki olduğunu ($r^2 = 1,0$) ve bu parametrelerin benzer kaynaklardan geldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca hidrokarbonlar ile bakır ($r^2 = 0,972$), askıda katı maddeler ($r^2 = 0,944$) ve demir ($r^2 = 0,865$) arasında da yüksek korelasyonlar gözlemlenmiştir. Arıtılmış atıksulara ilişkin yapılan sağlık risk değerlendirmeleri, gerek kanserojen gerekse de kanserojen olmayan etkiler açısından belirgin bir sağlık riski ortaya koymamıştır. Bununla birlikte, arıtılmamış atıksular için yapılan hesaplamalarda, toplam tehlike katsayıları (Tİ), belirli koşullarda sağlık açısından dikkate alınması gereken potansiyel bir risk olabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak elde edilen bulgular, siyanür ve bazı ağır metallerin oluşturabileceği risklerin düşük düzeyde olabileceğini göstermekle birlikte, bu durumun kesinleştirilebilmesi için ileri düzey toksikolojik ve epidemiyolojik çalışmalarla desteklenmesi gerektiğine işaret etmektedir. Ayrıca, çevresel ve halk sağlığı üzerindeki uzun vadeli etkilerin anlaşılması için kapsamlı izleme programları gereklidir.

Characterization of wastewater from waste oil recovery plants and assessment of potential risks to human health

HIGHLIGHTS

- Concentrations of metals, hydrocarbons, phenol, cyanide, COD, and oil/grease were determined
- Carcinogenic and non-carcinogenic health risks were calculated
- Hazard index (HI) values for cyanide exceeded 1, with 2.08 for adults and 17.5 for children

Article Info

Research Article

Received: 20.11.2024

Accepted: 03.03.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1588441

Keywords:

Waste oil recovery plants, health risk assessment, wastewater characterization, potential public health risks

ABSTRACT

In this study, the chemical characterization of wastewater originating from waste oil recovery facilities was conducted; relationships among pollutants were evaluated, and the potential health risks of treated and untreated wastewater were analyzed. Average concentrations in wastewater analyses were determined as follows: ammonium 367 mg/L, suspended solids 361 mg/L, hydrocarbons 24,252 mg/L, oil and grease 26,736 mg/L, copper 0.51 mg/L, lead 0.088 mg/L, and cyanide 914 mg/L. Correlation analyses revealed a very strong relationship between hydrocarbons and oil-grease ($r^2 = 1.0$), indicating these parameters likely originate from similar sources. High correlations were also observed between hydrocarbons and copper ($r^2 = 0.972$), suspended solids ($r^2 = 0.944$), and iron ($r^2 = 0.865$). Health risk assessments for treated wastewater showed no significant risk for either carcinogenic or non-carcinogenic effects. However, calculations for untreated wastewater indicated hazard indices (HI) suggesting a potential health risk under certain conditions. Overall, the findings suggest that risks posed by cyanide and certain heavy metals may be low, although further advanced toxicological and epidemiological studies are needed to confirm this. Additionally, comprehensive monitoring programs are necessary to understand the long-term environmental and public health impacts.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / *Corresponding Author/Authors: *volkan.pelitli@tubitak.gov.tr / Tel: +90 262 677 2998

1. Giriş (Introduction)

Otomotiv, endüstriyel, havacılık ve denizcilik uygulamalarından kaynaklanan atık (kullanılmış) madeni yağlar, aşındırıcılık, reaktivite, alevlenebilirlik ve toksisite gibi tehlikeli özellikler sebebiyle tehlikeli atıklar arasındaki en büyük sekizinci atık kategorisi olarak sınıflandırılmakta olup, genel olarak meydana gelen sızıntılar, çevreye yayılma ve kullanım sırasındaki kayıplar nedeni ile satılan yağların %50'sini oluşturmaktadır [1-3]. Bu yağlar, üretim aşamasında aşırı basınç (EP) ve aşınma önleyici (AW) olarak eklenen ağır metaller (Fe_3O_4 , FeS , CuO , nano-Cu, Cu/MoS_2 , ZnO , Al_2O_3 , ZrO_2), klor ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2-y}\text{Cl}_y$) ve kükürt (CH_2NS_2 , $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{S}_2$, $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{S}_2$) gibi katkı maddeleri ile kullanımları sırasında meydana gelen yüksek sıcaklık, oksidasyon ve aşınma nedeniyle çok çeşitli kirleticileri (Cr, Pb, Fe, Cu, Zn, Cd, Hg) bünyesinde barındırmaktadır [2, 4-7]. Bu nedenle, atık yağların uygunsuz şekilde yönetilerek çevreye yayılması hem insan sağlığı hem de çevre için önemli tehditler (trofik etkileşim, doğal mikroorganizma yapısı, toprak biyosenöz ve mikrobiyotasının etkilenmesi) oluşturmaktadır [8].

Bu noktada; en iyi atık yönetimi yaklaşımı, Sürdürülebilir Kalkınma Amacı Hedef 12: Sürdürülebilir Tüketim ve Üretim Modellerini Sağlamak, Atık Çerçeve Direktifi (Atık Hiyerarşisi Madde 4.2) ve Yeni Döngüsel Ekonomi Eylem Planı'na uygun olarak rekabetçi ekonomiyi teşvik etmek ve desteklemek amacıyla 08 03, 12 01, 13 01, 13 02, 13 03, 13 05, 19 02 ve 19 08 kodlu atık yağların geri dönüşümü yani geri kazanımıdır [9-12]. Geri kazanım tesislerinde, susuzlaştırma (400-640 mmHg vakum altında, $\leq 90-120^\circ\text{C}$), solvent uzaklaştırma (620-740 mmHg vakum altında, $\leq 220-280^\circ\text{C}$), ince film buharlaştırma/distilasyon, solvent ekstraksiyon (N-metil piroolidon) /hidrojenasyon (ort. 100 bar, 300°C), buharla yıkama ve nem alma gibi çeşitli prosesler ile atık yağlar, tonu 470-1760 € arasında değişen Grup I-II baz yağlar (TS 13369) ile asfalt katkı maddelerine (TS 103) dönüştürülmektedir [13]. Ancak bu işlemler sırasında, diğer atıklarla birlikte (ör. tank dibi çamurları, ıskarta anorganik/organik kimyasallar, sıvı/katı yanabilir atıklar, asit katranları, kullanılmış filtre kileri) atık yağların %4,77±1,38'i oranında atıksu da oluşmaktadır. Küresel ölçekte her yıl ortalama 20 milyon ton atık yağ olduğu göz önüne alındığında, dünya genelinde faaliyet gösteren yaklaşık 400 tesis tarafından yılda 954±276 bin ton mertebesinde atıksu üretilmesi beklenmektedir [14, 15]. Bu atıksular özellikle fenoller, amonyak, sülfidler, askıda katı maddeler (AKM), çözünmüş katı maddeler, toksik metaller, toplam petrol hidrokarbonları (TPH), polinükleer aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) ve BTEX bileşikler (benzen, toluen, etil benzen ve ksilen) gibi zararlı bileşikler içerdiğinden, yeterli arıtmaya tabi tutulması ya da arıtılmaya kadar yasal düzenlemeler ve yönergeler uyarınca güvenli tanklar/konteynerlerde depolanması, sızıntı ve dökülmelerin önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır [8, 16, 17]. Aksi takdirde, insan sağlığı ve tarımsal üretim üzerinde olumsuz etkiler meydana gelebilmektedir [18]. İnsan sağlığı üzerindeki etkiler arasında cilt kanserleri, göz ve üst solunum yolları tahrişleri, baş ağrısı, yorgunluk, alerji ile akciğer, karaciğer, böbrek ve kalp rahatsızlıkları yer almaktadır [19- 21]. Çevresel tehditler ise sucul ekosistemde fotosentez sürecinin azalması, su sıcaklığının artması, ötrofikasyon ve metabolik bozukluklar ile toprak ortamında azot, karbon ve fosfor dağılımının bozulması ve oksijen eksikliği nedeniyle toprak sağlığının zarar görmesidir [22-24]. Bu sebeple arıtılmamış veya yetersiz arıtılmış atıksuların, akarsulara ve diğer su kütlelerine kazara salınması durumunda maruziyetten kaynaklanabilecek hastalık riskleri halk sağlığı üzerinde ciddi tehditler oluşturabilmektedir [25, 26]. Özellikle petro rafineri atıksularında bulunan kirleticiler karaciğer, böbrekler, solunum yolu, akciğerler üzerinde olumsuz etkiler yaratmakta ve meme, kolon ve prostat gibi farklı kanser risklerini artırabilmektedir [27]. Ayrıca, bu atıksuların alıcı su kütlelerinde toksik birikime yol açması, yalnızca

insan sağlığını değil, tüm ekosistemi de ciddi şekilde etkilemektedir [28]. Bu nedenle, küresel su güvenliği ve kirliliği, günümüzün en önemli çevresel ve toplumsal sorunlarından biri haline gelmiştir [25]. Bu noktada, Birleşmiş Milletler (BM) bu soruna dikkat çekmek amacıyla, 2023 yılı Dünya Su Günü temasını "Su ve Sanitasyon Krizini Çözmek için Değişimi Hızlandırmak" olarak belirlemiştir. Bu tema, küresel su ve sanitasyon krizini ele almak ve 2030 yılına kadar herkes için su ve sanitasyonu erişim sağlamak amacıyla belirlenen Sürdürülebilir Kalkınma Amacı 6'ya ulaşmak için kolektif eyleme duyulan acil ihtiyacı vurgulamaktadır [29]. Bu bağlamda, atıksu yönetimi, hem halk sağlığını korumak hem de ekosistemlerin zarar görmesini önlemek için kritik bir ihtiyaç olarak görülmektedir.

Gerçekleştirilen bilimsel literatür taramaları (DergiPark, Google Scholar, IEEE *Xplore*, JSTOR, PubMed, ScienceDirect, Scopus), atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksular veya arıtılmış atıksularla ilgili daha önce yapılmış herhangi bir çalışma bulunmadığını göstermiştir. Bu bağlamda, mevcut çalışma, literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracak olup, atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksulardaki kirleticilerin belirlenmesi ve olası insan sağlığı risklerinin araştırılması açısından ilk olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca, bu tesislerin dünya çapında birçok ülkede (A.B.D., Almanya, Bulgaristan, Danimarka, Finlandiya, Fransa, İngiltere, İran, İspanya, İtalya, Kanada, Polonya, Portekiz, Tunus, Yunanistan) faaliyet gösterdiği de göz önüne alındığında, bu araştırmanın uluslararası düzeyde büyük bir öneme sahip olduğu açıktır [30].

Bu kapsamda, mevcut çalışmanın amacı; atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksular ile arıtılmış atıksuların kapsamlı biçimde incelenmesi ve bu suların potansiyel insan sağlığı risklerine yol açma olasılığına ilişkin bilimsel boşluğun doldurulmasıdır. Çalışma, deri teması ihmal edilebilir olduğundan, hem yetişkinler hem de çocuklar için sindirim ve solunum yoluyla maruziyet senaryolarına odaklanmıştır. Bu doğrultuda, çalışmanın amaçları:

- Atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksulardaki organik ve inorganik kirleticiler de dahil olmak üzere atıksuların kimyasal bileşimlerini analiz etmek,
- Atıksu parametreleri arasındaki ilişkileri belirlemek ve bu parametrelerin değişimlerini incelemek,
- Arıtılmış atıksularla birlikte atıksuların arıtılmadan kazara alıcı ortamlara verilmesi durumunda yetişkinler ve çocuklar için maruziyet ve bunun sonucunda oluşabilecek potansiyel insan sağlığı risklerini (kanserojen olmayan ve kanserojen) araştırmaktır.

Bu kapsamda, mevcut çalışma ilk kez küresel ölçekte atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksu ve arıtılmış atıksuların kapsamlı bir değerlendirmesi ve potansiyel sağlık risklerini sunmaktadır. Elde edilen bulgular, geri kazanım tesislerinin çevresel performanslarını iyileştirecek politika araçlarının geliştirilmesi ve kirleticiler özelliklerinin daha iyi anlaşılmasıyla halk sağlığının korunmasında kritik bir rol oynayacaktır. Ayrıca, kirleticiler için elde edilen saha bazı gerçek konsantrasyonlar, ilerleyen çalışmalarda çevresel ve halk sağlığı risklerinin daha kapsamlı analiz edilmesine de olanak sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metot (Materials and Methods)

2.1. Örneklem (Sampling)

Atık yağ geri kazanım tesislerinden alınan atıksu numuneleri ile, müferrit olarak faaliyet gösteren tesislerden arıtma sonrası alınan arıtılmış atıksu örnekleri analiz edilmiştir. Geri kazanım tesislerinin kapasiteleri 800 ile 60.000 ton/yıl arasında değişmekte olup, ortalama

kapasiteleri 8.900 ($\pm$ 12.500) ton/yıl'dır. Tesislerin ortalama kapalı alanları ise 3.000 ($\pm$ 2.900) m² olup, her bir tesiste ortalama 20 personel görev yapmaktadır. Bu tesislerde geri kazanım prosesleri sonucunda, Grup I (TS 13369 Sınıf 2 Tip 1 Grup 1) veya Grup II (TS 13369 Sınıf 2 Tip 2 Grup II) baz yağ üretimleri gerçekleştirilmektedir.

Sektör için NACE (Rev. 2) kodları Tablo 1'de sunulmuştur [31, 32]. NACE Rev. 2 Kodu 19.20.16 altında, petrolden madeni yağların (yağlama ve makine yağları dahil) imalatını yapan 21 tesis, orta-düşük teknoloji sınıfında faaliyet göstermektedir. NACE Rev. 2 Kodu 38.12.01 kapsamında, tehlikeli atıkların toplanmasıyla ilgili 2 tesis yer alırken, NACE Rev. 2 Kodu 38.22.01 altında ise, tehlikeli atıkların ıslahı ve bertarafı ile ilgili 2 tesis bulunmaktadır. Bu tesisler, çevreye zarar veren tehlikeli atıkların yönetiminde kritik rol oynayarak, atıkların güvenli bir şekilde toplanması ve geri kazanılmasını sağlamakta ve aynı zamanda doğal kaynakların korunmasına da katkıda bulunmaktadır. Tesislerin %80'ni Organize Sanayi Bölgelerinde faaliyetlerini sürdürmekte olup, geri kalan 5 tesis ise münferit olarak üretimlerine devam etmektedir.

Karakterizasyon çalışmaları 2020 ile 2024 yılları arasında gerçekleştirilen saha çalışmaları sırasında alınan su numuneleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler akredite laboratuvarında

standart yöntemlere (SM) uygun olarak gerçekleştirmiştir [33]. Tesis isimleri ve konumları rekabet kısıtlamaları nedeniyle belirtilmemiş ve çalışma boyunca kodlama yöntemi kullanılarak temsil edilmiştir. 2020-2024 yılları arasında alınan su numunelerine ait veriler Tablo 2'de sunulmuştur.

Örnekleme sırasında, her numune için standart bir protokol uygulanmış ve yeni-kullanılmamış numune alma şişeleri, işlem öncesinde titizlikle temizlenmiştir. Numuneler, oluşum anında kompozit olarak, reaktörlerin numune alma noktalarından bekletilmeden alınmıştır [34]. Cam numune şişeleri, örneklerle tamamen doldurulmuş ve "Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Numune Alma ve Analiz Metotları Tebliği" uyarınca, bozulmanın önlenmesi amacıyla tesiste konsantre sülfürik asit ve sodyum hidroksitle soğuk ortamda koruma altına alınarak analizlerin gerçekleştirileceği laboratuvara getirilmiştir (3 l atıksu – H₂SO₄ ile pH $\leq$ 2, 3 l atıksu – kendi pH değeri, 3 l atıksu – NaOH ile pH $\geq$ 12) [35].

2.2. Fizikokimyasal Analizler (Physicochemical Analysis)

Çalışma kapsamında ölçülen fizikokimyasal parametreler arasında pH, AKM, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), sülfür, amonyum azotu (NH₄-N), fenol, siyanür, hidrokarbon, yağ-gres, fosfor ve Kjeldahl

Tablo 1. Atık yağ geri kazanım tesisleri: NACE kodları (Waste oil recovery facilities: NACE codes)

NACE Rev.2 Kodu	Bölüm	Sektör	Tesis Sayısı
19.20.16	C	Petrolden madeni yağların (yağlama ve makine yağları) imalatı (gres yağı dahil)	21
38.12.01	E	Tehlikeli atıkların toplanması (patlayıcı, oksitleyici, yanıcı, zehirli, aşındırıcı, bulaşıcı ve insan sağlığı için zararlı atıkların ve maddelerin toplanması faaliyetleri) (nükleer atıklar, biyokimyasal atıklar, kullanılmış piller vb.)	2
38.22.01	E	Tehlikeli atıkların ıslahı ve bertaraf edilmesidir (tehlikeli atıkların ıslahını yapan tesislerin işletilmesi, zararlı atıkların yok edilmesi için kullanılmış malların bertarafı vb. faaliyetler) (radyoaktif atıklar hariç)	2

Tablo 2. Numune bilgileri (Sample informations)

Yıl	Dönem	Numune Sayısı	Geri Kazanım Yöntemi	Atıksu Kaynakları
2020	Eylül - Ekim	2	Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 1) Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, ince film buharlaştırma, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 1) Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 4)	
2021	Ocak - Eylül	8	Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, ince film buharlaştırma, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 3) Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, ince film buharlaştırma, hidroişlem (Tesis Sayısı: 1)	Su ve Hafif Hidrokarbon Uzaklaştırma Reaktörleri & Solvent (N-metil pirrolidon) Ekstraksiyon
2022	Şubat - Aralık	10	Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 7) Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, ince film buharlaştırma, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 3) Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 1)	Sonrası Buharla Yıkama + Kurutma Üniteleri
2023	Mart - Ağustos	2	Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, ince film buharlaştırma (Tesis Sayısı: 1) Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 1)	
2024	Ocak - Haziran	3	Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 1) Susuzlaştırma, atmosferik distilasyon, ince film buharlaştırma, solvent ekstraksiyonu (Tesis Sayısı: 2)	

Azotu yer almaktadır. Bu parametreler sırasıyla, SM 4500- H⁺, SM 2540 D gravimetrik, SM 553 B açık reflüks, SM- 4500-S F iyodometrik, SM 4500 NH₃-N B, SM 553 B, ISO 14403-1 akış enjeksiyon, ASTM D 7066-04, SM-5520 E, SM 4500 P-B ve SM 4500- N_{org}B yöntemlerine göre analiz edilmiştir [36]. Analiz edilen parametreler, istatistiksel ilişkilerin belirlenmesi (Microsoft Office Excel, Office 365) amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, farklı kirlenici türleri (organik-inorganik) arasındaki anlamlı değişimler de çalışma kapsamında incelenmiştir.

2.3. Elementel Analiz (Elemental Analysis)

Eser metal kirliliği, insan ve çevre sağlığının korunması bakımından son derece önemlidir. Bu nedenle, ağır metal hareketliliğinin belirlenmesi amacıyla 6 adet çözünmüş ve pseudo metali (Cr, Cd ve Pb) analizi, EPA Metot 6020'ye uygun olarak İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektrometresi (ICP-MS, PerkinElmer NexION 300X, ABD) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ICP-MS tekniği, bu tür çalışmalar için en iyi yöntemlerden biri olarak kabul edilmekte olup, aynı zamanda atıksu numunelerindeki inorganik içeriklerin belirlenmesi amacıyla Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından da önerilmektedir [37]. Numune hazırlama ve analiz süreçlerinde farklı kalite güvence ve kalite kontrol adımları uygulanmış; bu çerçevede blank numuneler ve referans materyaller kullanılarak her analiz setinden önce (on numunede bir) üçer kez okuma yapılmıştır. Analiz koşullarına ilişkin bilgiler Tablo 3'de özetlenmiştir.

Analiz sürecinde kullanılan koşullar, elde edilen verilerin doğruluğu ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Nübulizer gaz akışı 0,93 ml/dk., yardımcı gaz akışı 1,20 ml/dk. ve plazma gaz akışı ise 18,00 ml/dk. olarak ayarlanmıştır. Deflektör voltajı -10,00 V seviyesinde tutulmuş ve vakum değeri 1,20 x 10⁻⁷ olarak belirlenmiştir. Kalibrasyon aralığı 0,5 – 150 ppb olarak belirlenirken, analizlerde kullanılan iç standart konsantrasyonu 100 mg/l'dir ve bu amaçla yüksek saflıkta ICP-MS-68B-A-100 %4 HNO₃ (ABD) çözeltisi kullanılmıştır. Bu sayede analiz hassasiyetleri artırılarak güvenilir sonuçlar elde edilmesine olanak sağlanmıştır.

2.4. Sağlık Risk Değerlendirmesi (Health Risk Assessment)

Atıksuların ağır metaller tarafından kirlenmesi, insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturabildiğinden güncel bir sorun olmaya devam etmektedir. Kirlenici ile insan sağlığına yönelik potansiyel riskler arasındaki ilişki, ABD Çevre Koruma Ajansı (U.S. EPA) tarafından önerilen ayrıntılı insan sağlığı risk metodolojisi ile değerlendirilebilmektedir [38-40]. U.S. EPA metodolojisi; Risk Değerlendirme Bilgi Sistemi (RAIS), Entegre Risk Bilgi Sistemi (IRIS) ve Zehirli Maddeler ve Hastalık Kayıt Dairesi (ATSDR) tarafından da desteklenmektedir [41-43]. Bu nedenle, çalışma kapsamında U.S. EPA'ya benzer bir yaklaşım benimsenmiştir.

İnsan sağlığı üzerindeki olumsuz etkiler, temel olarak sindirim, solunum ve deri teması yoluyla ortaya çıkmaktadır. Pek çok geçmiş çalışma ve yönetmelik, insan sağlığı riskleri için en önemli maruz kalma yollarının sindirim ve solunum olduğunu vurgulamış ve bu

maruziyetler için çeşitli standartlar belirlemiştir. Deri temasının ise ihmal edilebilir bir risk oluşturduğu belirtilmiştir [44-47]. Bu sebeple, mevcut çalışmada insan sağlığı risk değerlendirmesi, sindirim ve solunum maruziyet yolları seçilerek (hem kanserojen hem de kanserojen olmayan) krom (Cr), kurşun (Pb), toplam siyanür, demir (Fe), bakır (Cu), kadmiyum (Cd) ve cıva (Hg) için gerçekleştirilmiştir. U.S. EPA'ya göre, bu kirleniciler insan sağlığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilecek toksik kirleniciler olarak tanımlanmakta ve hem kanserojen hem de kanserojen olmayan riskleri artırabilmektedir [48-50]. Potansiyel risk değerlendirmesi, yetişkinler ve çocuklar olmak üzere iki grup için gerçekleştirilmiştir. Belirtildiği üzere, cilt teması sonucu oluşacak riskler, sindirim ve solunum yoluyla gerçekleşen maruziyete kıyasla yaklaşık 100 kat daha düşük olduğundan ihmal edilmiştir [39]. Sonuç olarak, U.S. EPA'ya benzer bir metodoloji ile yapılan kapsamlı potansiyel risk değerlendirmesi, bu kirlenicilerin olası etkilerini anlamada kritik rol oynamıştır.

2.4.1. Kanserijen Olmayan Risk Değerlendirmesi (Non-Carcinogenic Risk Assessment)

İlk tahmin, kirlenicilerin kanser dışındaki potansiyel sağlık etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, sağlık risk değerlendirmesi, dört ana bileşenden oluşmaktadır: Tehlike tanımlama, maruziyet değerlendirme, doz-cevap ilişkisi ve risk karakterizasyonu. Değerlendirme sürecinde, kirlenici bazlı Günlük Ortalama Doz (kronik konsantrasyon) değerleri (GDD, mg kg⁻¹ gün⁻¹) hesaplanmıştır [49, 51, 52]. Kanserijen olmayan risk seviyeleri ise Amerika ve Kanada'da uygulanmakta olan Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3'den yola çıkılarak hesaplanmıştır (kararlı hal) [50, 53-55].

$$GDD_{Sindirim} = \frac{C_s \times IR_{sindirim} \times MSK \times MSÜ}{VA \times OS} \times DF \quad (1)$$

$$GDD_{Solunum} = \frac{C_s \times IR_{solunum} \times MSK \times MSÜ}{PEF \times VA \times OS} \quad (2)$$

$$GDD = GDD_{Sindirim} + GDD_{Solunum} \quad (3)$$

Burada kullanılan kavramlar;

- GDD_{sindirim} sindirim (oral) yoluyla alınan günlük ortalama doz değeri (mg kg⁻¹ gün⁻¹);
- GDD_{solunum} solunum yoluyla alınan günlük ortalama doz değeri (mg kg⁻¹ gün⁻¹);
- C_s kirlenicinin ortalama konsantrasyonu (sindirim ya da solunum yoluyla doğrudan maruz kalan kirlenici konsantrasyonu değildir, mg l⁻¹);
- IR_{sindirim} kirlenicinin sindirim yoluyla tüketim hızı (yetişkinler için 100 mg ve çocuklar için 200 mg gün⁻¹);
- IR_{solunum} kirlenici solunum hızı (yetişkinler için 20 ve çocuklar için 7,6 m³ gün⁻¹);
- MSK maruziyet sıklığı (350 gün yıl⁻¹);
- MSÜ maruziyet süresi (yetişkinler için 30 yıl ve çocuklar için 6 yıl);
- DF birim dönüşüm faktörü (1 x 10⁻⁶ mg kg⁻¹), VA ortalama vücut ağırlığı (yetişkinler için 70 kg ve çocuklar için 16 kg),

Tablo 3. ICP-OES analiz koşulları (ICP-OES operating conditions)

Analiz koşulları	Değerler
Nübulizer Gaz Akışı	0,93 ml/dk.
Yardımcı Gaz Akışı	1,20 ml/dk.
Plazma Gaz Akışı	18,00 ml/dk.
Deflektör Voltajı	-10,00 v
Vakum	1,20x10 ⁻⁷
Kalibrasyon Aralığı	0,5 – 150 ppb
İç Standart Konsantrasyonu	100 mg/l (Yüksek saflıkta standart, ICP-MS-68B-A-100 %4 HNO ₃ , ABD)

- OS ortalama süredir (MSÜ x 365 gün) ve PEF iklim bazlı partikül emisyon faktörüdür (1,36 109 m3 kg-1) [39, 54, 56-59].

Tehlike katsayısı (TK), insanların uzun süre boyunca kanserojen olmayan bir kirleticie maruz kalmasının ardından ortaya çıkabilecek herhangi bir kanserojen olmayan risk veya kronik toksisiteyi göstermektedir. Bu katsayı, Eş. 1 ve Referans Risk Doz (RfD, mg kg⁻¹ gün⁻¹) değeri kullanılarak Eş. 4 yardımı ile hesaplanmıştır [60, 61]. RfD, maruziyet sonucunda sağlık açısından herhangi bir olumsuz etkinin olmayacağı en yüksek ortalama değer olarak kabul edilmektedir [50]. Mevcut çalışma, sindirim ve solunum yoluyla maruziyet için kirleticiler için RfD değerlerini dikkate almıştır.

$$TK = \frac{GDD}{RfD} \quad (4)$$

Bir kirleticiler için risk değerlendirmesinin bir sonraki adımı, Tehlike İndeksinin (Tİ) hesaplanmasıdır. Bu indeks, kirleticilerin insan sağlığı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Buna göre Tİ, TK'nin toplamı olarak Eş. 5 ile ifade edilmektedir [56, 61].

$$Tİ = \sum_{i=1}^n (TK)_i \quad (5)$$

Burada, n eşitliğe entegre edilen toplam kirleticiler sayısını temsil etmektedir. Hesaplanan Tİ değeri 1'den küçükse, insanlarda herhangi bir sağlık riski görülmeceği sonucuna varılmaktadır. Ancak Tİ değeri 1 veya üzeri ise, tüketicilerin sağlığına yönelik orta veya yüksek düzeyde potansiyel risklerin ortaya çıkması beklenmektedir [62, 63]. Genel olarak, kanserojen olmayan sağlık risk değerlendirmesi şu şekilde sınıflandırılmaktadır.

Tİ < 1: Düşük risk / Tİ = 1: Orta risk / Tİ > 1: Yüksek risk

2.4.2. Kanserijen Risk Değerlendirmesi (Carcinogenic Risk Assessment)

Potansiyel kanserojen risk değerlendirmesi, kirleticiler maruziyetine bağlı olarak kanserojen sağlık risk değerinin hesaplanması ile gerçekleştirilmektedir. Bu değer genel olarak bir bireyin yaşamı boyunca yani ortalama 70 yıl, potansiyel bir kanserojene 24 saat maruz kalması sonucu herhangi bir kanser türüne yakalanma olasılığının artmasıdır ve RİSK indeksi ile ifade edilmektedir [64, 65]. Eğer birden fazla kanserojen kontaminasyonu varsa, tüm kanserojenlerin ve maruz kalma yollarının kanser riski toplanarak ifade edilmektedir. Bu endeksi hesaplamak için kullanılan Eş. 6 aşağıda verilmiştir [50].

$$RİSK = GDD \times KEF \quad (6)$$

Kanser Eğim Faktörü (KEF, mg kg⁻¹ gün⁻¹) genel olarak A, B1 ve B2 sınıftaki kanserojen kirleticiler için literatürde hesaplanmış ve ihtimal olarak ifade edilmektedir. Bu değerler belirli bir kimyasal için insan ve hayvan çalışmalarından elde edilmiştir [66]. Ancak sadece Cr, Pb ve Cd için KEF değerleri mevcut olduğundan Cr, Pb ve Cd için potansiyel kanserojen risk değerleri hesaplanmıştır [67]. Tek kanserojen veya çok elementli kanserojenler için izin verilen sınırlar $10^{-6} < RİSK < 10^{-4}$ olarak kabul edilmektedir [57]. RİSK değeri $\leq 1 \times 10^{-6}$ ise ihmal edilebilir ve $\geq 1 \times 10^{-4}$ ise kabul edilemez olarak değerlendirilmektedir [68]. Kirleticiler için literatürde belirlenen RfD ve KEF değerleri Tablo 4'de özetlenmiştir.

2.5. Deşarj Standardı (Discharge Standard)

Atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksular, organik kirleticiler, petrol hidrokarbonları ve ağır metaller gibi inorganik

kirleticiler de dahil olmak üzere çok sayıda tehlikeli bileşikten oluşmaktadır [77]. Sektör için belirlenen spesifik bir SKKY (2004) tablosu (Tablo 1-25) bulunmamakla birlikte, deşarj amacıyla OSB bazlı kanal bağlantı parametreleri, SKKY Tablo 19, 11.1 ve 25 kullanılabilmektedir.

3. Deney Sonuçları (Experimental Results)

3.1. Kirleticiler Seviyeleri (Levels of Pollutants)

Atık yağ geri kazanım ya da rafinasyon işlemi günümüz endüstrisinde oldukça önemli olmakla birlikte, bu süreçte oluşan proses atıksuları da birçok kirleticieyi bünyesinde barındırmaktadır. Tesisten kaynaklanan atıksular tank dibi atıksuları, susuzlaştırma ve solvent uzaklaştırma atıksularından oluşmakta olup, atıksu miktarları da işlenen atık yağ miktarının yaklaşık %4,77 ± 1,38 mertebesinde. En iyi arıtma alternatiflerinin dizaynı ile birlikte yeniden kullanım stratejilerinin belirlenmesi ve olası çevresel etkilerin anlaşılması içinse, atıksularda bulunan tehlikeli kirleticilerin miktar, kaynak ve türlerinin bilinmesi oldukça önemlidir [77]. Bu kapsamda atıksularda analiz edilen çevresel kirleticilerin kaynak ve türleri Tablo 5'de özetlenmiştir. Mevcut kirleticiler arasında yer alan petrol hidrokarbonları, yağ-gres, fenol, ağır metaller, çözünmüş mineraller ve KOİ'ye sebep olan refrakter-organik bileşikler, genel olarak çevresel açıdan en önemli kirleticiler olarak tanımlanmaktadır [78, 79]. Bu sebeple atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanan atıksuların, yüzey veya deniz sularına deşarjı dünya çapında çevresel mevzuatla sıkı şekilde düzenlenmiştir [80]. Bundan dolayı, atık yağ geri kazanım ya da rafinasyon işleminden kaynaklanan atıksuların özelliklerinin bilinmesi oldukça önemlidir.

Atıksu numunelerinin analiz sonuçları, tanımlayıcı istatistiksel değerlerle birlikte Tablo 6'da sunulmuştur. Ayrıca, Avrupa'da faaliyet gösteren petrol rafinelerinin su ortamına verdikleri (grab) kirleticiler değerleri de karşılaştırma amacıyla tabloya eklenmiştir [82]. Kirleticiler konsantrasyonları incelendiğinde tesisten tesise büyük değişkenlikler gösterdiği tespit edilmiştir. Tesislerde genel olarak 13 01 kodlu atık hidrolik yağlar, 13 02 kodlu atık motor, şanzıman ve yağlama yağları ile 13 03 kodlu atık yalıtım ve ısı iletim yağları işlenmektedir. Bu nedenle, atıksu karakteristiğindeki temel değişim, her tesiste su ve hafif hidrokarbonların (solventlerin) uzaklaştırılması amacıyla kullanılan reaktörlerde uygulanan farklı sıcaklık ve vakum değerlerinden kaynaklanmaktadır. Bu süreçte, hafif hidrokarbonların birçoğu atıksuya karışabilmektedir. Bunun sonucunda, atıksular NH₄-N, AKM, fenol, hidrokarbonlar, KOİ, siyanür, yağ ve gres açısından yüksek kirleticiler içerdiğine sahip olmaktadır. Ayrıca, kirleticiler içeriği, inorganik bileşiklerden ziyade esas olarak organik kirleticilerden kaynaklanmakta olup, inorganik bileşiklerin katkısı daha düşüktür. Bu bağlamda, susuzlaştırma süreçlerinde sıcaklık ve vakum değerlerinin optimize edilmesi, oluşan atıksulardaki kirleticiler yükünün azaltılması açısından kritik öneme sahiptir.

Atıksuların yüksek organik içeriği, arıtma tesislerindeki biyolojik arıtmalar üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilmektedir [83]. Ayrıca, fizikokimyasal arıtma verimliliği de etkilenmektedir. Bu sebeple tesislerde kullanılabilecek atıksu ön arıtma proseslerinin amacı, emülsiyon kırma (demülsifikasyon) ve destabilizasyon olmalıdır [84]. Bu sonuçlar tesislerde seçilen geri kazanım teknolojileri ve tesis bazlı atıksu yönetimine ilişkin düzenlemelerin oldukça önemli olduğunu göstermektedir. Yukarıda bahsedilen organik kirliliğe ilave olarak ayrıca, ağır metallerin de oldukça toksik ve doğada parçalanamaz olması nedeni ile atıksu ortamındaki miktarlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Bu metaller zamanla doğa da birikmekte ve gıda zincirine karışabilmektedir [85]. Yaygın şekilde karşılaşılan ağır metal ve metaloid kirleticiler Cu, Hg, Cd, Pb (oldukça toksik) ve Cr olup, bu kirleticiler günümüzde hala büyük endişe kaynağı konumundadır [86].

Tablo 4. RfD ve KEF değerleri (Values of RfD and CSF)

Kirletici	RfD _{Sindirir} mg kg ⁻¹ gün ⁻¹	RfD _{Solum} mg kg ⁻¹ gün ⁻¹	KEF mg kg ⁻¹ gün ⁻¹	Referans	Kanserojenlik Sınıfı
Cr	3,0 x 10 ⁻³	5,0 x 10 ⁻³	5,01 x 10 ⁻¹	50, 69-73	A
Pb	4,0 x 10 ⁻³	3,52 x 10 ⁻³	8,5 x 10 ⁻³	67, 69, 70, 71, 74	B2
Toplam Siyanür	6,3 x 10 ⁻⁴	2,0 x 10 ⁻⁹	-	75, 76	D
Fe	3,0 x 10 ⁻¹	2,2 x 10 ⁻⁴	-	69, 70, 73, 74	
Cu	4,0 x 10 ⁻²	4,02 x 10 ⁻²	-	67, 69, 70, 72-74	D
Cd	1,0 x 10 ⁻³	1,0 x 10 ⁻³	6,3	39, 74	-
Hg	3,0 x 10 ⁻⁴	1,0 x 10 ⁻⁴	-	39, 50	-

Tablo 5. Atık yağ geri kazanım tesisi atıksularında bulunan kirleticiler ve kaynakları (Pollutants and their sources in waste oil refining plant wastewater) [81]

Sınıf	Parametreler	Kaynak
Temel Kirletici Parametreler	- Hidrokarbonlar	- Tank dibi atıksuları (atık yağ stok tankları): KOİ, hidrokarbon ve AKM bakımından zengin - Susuzlaştırma ve solvent uzaklaştırma atıksuları (distilasyon üniteleri): KOİ, fenol, siyanür, azot, ağır metaller ve sülfür açısından zengin
	- KOİ	
	- AKM	
	- Ağır metaller: Cr, Pb, Cd, Fe, Cu, Hg	
	- Yağ ve gres	
Diğer Kirletici Parametreler	- Kjeldahl Azotu	- Yüzey temizleme-yağmur suları (kapalı devre): AKM, KOİ, ağır metaller ve hidrokarbon açısından zengin
	- NH ₄ -N	
	- Fenol	
	- Fosfor	
	- Siyanür	
	- Sülfat	
	- Sülfür	

Tablo 6. Atıksu analiz sonuçları ve tanımlayıcı istatistiksel değerler (Wastewater analysis results and descriptive statistical values)

No	Parametre	Konsantrasyon (mg l ⁻¹)	Ortalama ($\bar{X}$)	Standart Sapma ($\pm$)	Standart Hata (SE)	Varyans Katsayısı (%)	BAT (mg l ⁻¹)
1	NH ₄ -N	0,2 – 1.979	367	515	103,09	140,40	-
2	AKM	8,0 – 3.398	361	774	154,89	214,27	3,3 – 15,3
3	Cu	0,012 – 4,16	0,51	0,77	0,15	149,61	0,02 – 0,1
4	Hg	0,0001 – 0,025	0,003	0,005	0,001	163,73	< 0,001
5	Fe	0,5 – 22,2	2,5	4,63	0,93	185,11	0,12 – 0,19
6	Fenol	2,2 – 356	102,25	91,35	18,27	89,34	0,04 – 38,17
7	Hidrokarbonlar	13,7 – 532.450	24.252	106.187	21.237	437,85	0,2 – 23,3
8	Cd	0,0001 – 0,1	0,068	0,046	0,01	67,73	0,0024 – 0,1
9	KOİ	2.978 – 1.479.500	206.586	343.804	68.760	166,42	33 – 17.075
10	Pb	0,0038 – 0,257	0,088	0,052	0,01	59,39	0,01 – 0,08
11	pH	2,0 – 9,8	7,2	1,65	0,33	22,93	6,8 – 7,9
12	Sülfür	0,001 – 0,78	0,664	0,26	0,05	40,06	-
13	Cr	0,0029 – 0,275	0,0857	0,0524	0,01	61,14	0,02 – 0,1
14	Siyanür	2,7 – 9.075	914	1.864	372,80	203,90	-
15	Yağ ve Gres	56,75 – 582.175	26.736	113.812	22.762	425,68	-

Bu sebeple ağır metallerin önemi 2010/75/AB sayılı Endüstriyel Emisyonlar Direktifi, 2004/107/AK sayılı Dış Ortam Havası içerisindeki Arsenik, Kadmiyum, Çıva, Nikel ve Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlara İlişkin Direktif ve 2008/50/AK sayılı Avrupa için Ortam Hava Kalitesi ve Temiz Hava Direktifinde rapor edilmiştir [87, 88]. Varyans katsayısı değişimleri incelendiğinde, pH, sülfür, Cr, Pb ve Cd dışındaki parametrelerdeki değişimlerin oldukça heterojen olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle hidrokarbon (%437,85), yağ ve gres (%425,68), AKM (%214,27) ve siyanür (%203,90) parametrelerinde varyans katsayıları son derece yüksek seviyelerde seyretmektedir.

3.1.1. Parametreler Arasındaki Korelasyon (Correlation Between Parameters)

Parametreler arasındaki karşılıklı ilişkilerin tespit edilmesi amacıyla, atıksu parametreleri arasındaki Pearson korelasyon katsayıları (r^2) hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 7'de sunulmuştur.

Korelasyon katsayısı 0,8-1,0 aralığında olan parametreler arasındaki ilişkilerin güçlü olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda parametrelerin çoğu arasında güçlü pozitif korelasyonlar bulunmaktadır. Pearson korelasyon katsayılarına göre aralarında güçlü ilişki bulunan parametreler sırasıyla; yağ-gres ve hidrokarbonlar (1,0), hidrokarbonlar ve Cu (0,972), yağ-gres ve Cu (0,971), hidrokarbonlar ve AKM (0,944), Cu ve AKM (0,899), hidrokarbonlar ve Fe (0,865), yağ-gres ve Fe (0,863), Cr ve Cu (0,845), Fe ve AKM (0,841), Cr ve Pb (0,813), yağ-gres ve KOİ (0,806), hidrokarbonlar ve KOİ'dir ($\approx 0,8$).

Hidrokarbonlar ve yağ-gres arasında ($r^2=1,000$) çok güçlü bir pozitif korelasyon olduğu görülmektedir. Bu durum, her iki parametrenin de benzer kaynaklardan geldiğini ve birbirleriyle doğrudan ilişkili olduklarını göstermektedir. Ayrıca hidrokarbonlar, Cu ($r^2=0,972$), AKM ($r^2=0,944$) ve Fe ($r^2=0,865$) ile de yüksek korelasyon göstermektedir. Bu, hidrokarbon içeriğinin artışıyla birlikte bu metallerin de atıksularda daha yüksek konsantrasyonlarda

Tablo 7. Atıksu parametreleri arasındaki ilişkiler (Relationship between wastewater parameters)

	NH ₄ -N	AKM	Cu	Hg	Fe	Fenol	HK	Cd	KOİ	Pb	pH	S	Cr	SY	Y-G
NH ₄ -N	1														
AKM	-0,15	1													
Cu	-0,04	0,89	1												
Hg	-0,12	-0,08	-0,03	1											
Fe	-0,22	0,84	0,82	0,42	1										
Fenol	0,26	0,54	0,63	-0,13	0,41	1									
HK	-0,15	0,94	0,97	-0,03	0,86	0,56	1								
Cd	0,40	-0,34	-0,09	-0,25	-0,46	0,13	-0,27	1							
KOİ	-0,03	0,74	0,77	-0,08	0,61	0,51	0,79	-0,07	1						
Pb	0,11	0,63	0,73	-0,29	0,39	0,52	0,66	0,34	0,56	1					
pH	-0,00	0,01	-0,14	0,29	0,13	0,08	-0,05	-0,43	0,17	-0,29	1				
S	0,23	0,02	0,15	-0,34	-0,14	0,33	0,06	0,40	-0,12	0,09	-0,45	1			
Cr	0,13	0,67	0,84	-0,16	0,52	0,64	0,74	0,41	0,66	0,81	-0,34	0,41	1		
SY	-0,00	0,10	0,17	-0,08	0,09	0,32	0,17	-0,21	0,21	-0,03	0,08	0,19	0,05	1	
Y-G	-0,15	0,94	0,97	-0,04	0,86	0,56	1,00	-0,26	0,80	0,66	-0,05	0,05	0,74	0,17	1

Tablo 8. Atıksu parametrelerinin dağılımı (Distribution of wastewater parameters)

Parametre	Skewness	Kurtosis	Model Dağılımı
NH ₄ -N	1,68	2,41	Normal dışı
AKM	4,22	19,12	Normal dışı
Cu	4,52	21,83	Normal dışı
Hg	4,89	24,25	Normal dışı
Fe	3,65	13,74	Normal dışı
Fenol	1,21	1,04	Normal dışı
Hidrokarbonlar	4,97	24,77	Normal dışı
Cd	-0,82	-1,44	Normal
KOİ	2,99	8,75	Normal dışı
Pb	0,81	3,28	Normal
pH	-1,07	2,32	Normal dışı
Sülfür	-1,99	2,14	Normal dışı
Cr	1,40	5,99	Normal dışı
Siyanür	3,61	14,85	Normal dışı
Yağ ve Gres	4,94	24,57	Normal dışı

bulunduğunu düşündürmektedir. Benzer şekilde, AKM ile Fe ($r^2=0,841$), Cu ($r^2=0,899$) ve hidrokarbonlar ($r^2=0,944$) arasında güçlü pozitif korelasyonlar gözlemlenmiştir. Bu bulgular, ağır metallerin ve hidrokarbonların büyük ölçüde AKM'ye bağlı olarak taşındığını işaret etmektedir.

KOİ, Cu ($r^2=0,777$), AKM ($r^2=0,743$) ve hidrokarbonlar ($r^2=0,792$) ile pozitif korelasyon göstermektedir. KOİ'nin organik madde yüküyle doğrudan ilişkili olduğu düşünüldüğünde, bu metallerin organik bileşiklerle taşınabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, Pb ve Cr arasında ($r^2=0,813$) güçlü bir pozitif ilişki bulunması, bu metallerin benzer kaynaklardan atıksuya karıştığını göstermektedir. Öte yandan, Cd genellikle diğer parametrelerle negatif korelasyon göstermektedir (örneğin, AKM: $r^2=-0,348$, Hidrokarbonlar: $r^2=-0,270$). Bu durum Cd'nin atıksularda farklı bir davranış sergilediğini veya farklı bir kaynaktan geldiğini düşündürmektedir. Sularındaki pH değişiminin diğer parametrelerle düşük korelasyonlar göstermesi, atıksu bileşenleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ortaya koymaktadır. Bakırın diğer parametrelerle genellikle yüksek korelasyona sahip olmasının nedeninin ise, atıksu içerisindeki bakırın genel olarak kompleks formlar halinde bulunuyor olmasıdır. Genel olarak, korelasyon analizinden elde edilen bulgular, atıksudaki kirlenici parametrelerin kaynakları ve taşınım mekanizmaları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

3.1.2. Parametrelerin Dağılım Analizi (Analysis of Spatial Structures of Parameters)

Verilerin normal dağılıma uyup uymadığının doğrulanması amacıyla Skewness ve Kurtosis katsayıları hesaplanmıştır. Skewness katsayısının sıfır (0) ve Kurtosis katsayısının da üçe (3) yakın olması ideal bir normal dağılım (simetrik) olduğunu göstermekte olup, katsayıların büyümesi ise normallikten uzaklaşmaya işaret etmektedir [89]. Test sonuçları Tablo 8'de verilmiştir. Skewness ve Kurtosis katsayılarının genel olarak yüksek olması, analiz sonuçlarının belirli bir aralıkta yoğunlaştığını göstermektedir.

3.1.3. Temiz Üretim Tekniklerinin Atıksu Miktarı ve Karakterizasyonuna Etkisi (The Effect of Clean Production Techniques on Wastewater Quantity and Characterization)

Atık yağ geri kazanım tesislerinde su tüketimini optimize etmek, proses dışı atıksu hacmini azaltmak ve toprak ile suya emisyonları engellemek amacıyla, atık kabul, depolama, üretim sahası, proses kaynaklı atık depolama ve sevkiyat alanları geçirimsiz zeminle kaplanmıştır. Ayrıca, tesislerde kullanılan tanklarda yük hücreleri (load cell) yer almakta, yüzeysel akış suyu ile proses suları ayrı ayrı toplanmakta ve risk temelli olarak atık yağ depolama alanlarının etrafında atık havuzları bulunmaktadır.

Bununla birlikte, çevresel performansın iyileştirilmesi amacıyla, proses atıksuyu miktarı ve içeriğini etkileyebilecek atık yağ seçim prosedürleri, arıtma öncesi atıksuların ön işlemden (buharlaştırma, buharla sıyırma vb.) geçirilmesi ve genel olarak pH, iletkenlik ve KOİ değerlerine bağlı olarak atıksuların soğutma suyu olarak kullanılması gibi temiz üretim teknikleri ise uygulanmamaktadır [90].

3.2. Maruziyet Değerlendirmesi (Exposure Assessment)

3.2.1. Arıtılmış Atıksular (Treated Wastewaters)

Genel olarak arıtılmış evsel veya endüstriyel atıksular, tarımsal sulama, peyzaj ve rekreasyon uygulamaları, inşa edilmiş sulak alanlar, bölgesel soğutma, temizlik, yeraltı suyu deşarjı gibi çeşitli faaliyetlerde kullanılabilir. Bu nedenle hem yetişkinler hem de çocuklar, yeniden kullanım seçenekleri ve uygulamalarına bağlı olarak arıtılmış atıksulara maruz kalabilmektedir [91]. Bu bağlamda, münferit olarak faaliyet gösteren üç adet atıkyağ geri kazanım tesisi, atıksu arıtma tesisi artıma çıkışında örnekleme çalışması yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, Cu ($0,057 \text{ mg/l} \pm 0,050$), Hg ($< 0,0001 \text{ mg/l}$), Fe ($2,210 \pm 2,498$), Cd ($0,0001 \text{ mg/l} \pm 0,0001$), Pb ($0,007 \text{ mg/l} \pm 0,0046$), Cr ($0,008 \text{ mg/l} \pm 0,0039$) ve toplam

siyanür ($0,501 \text{ mg/l} \pm 0,498$) gibi kirleticiler açısından SKKY Tablo 19, 11.1 ve 25'te belirtilen sınır değerlerin aşılmadığını göstermiştir. Bu kirleticiler için tespit edilen ortalama arıtma verimi ise %89 ($\pm 5,4$) olup, en yüksek artıma verimi DAF sisteminin kullanıldığı fiziksel-kimyasal arıtma sisteminde elde edilmiştir. Petrol kökenli atıksular için literatürdeki arıtma verimleri %64,54 ile 99,97 arasında değiştiğinden, bu değer literatürdeki verilerle tutarlılık göstermektedir [92-94].

Karakterizasyon çalışması sonrasında, maruziyet senaryoları için günlük potansiyel maruziyet değerleri hesaplanmıştır. Yetişkinler için ortalama GDD, UCL ve LCL değerleri siyanür > Fe > Cu > Cr > Pb > Cd > Hg olarak tespit edilmiştir. Çocuklar içinde benzer şekilde toplam siyanür > Fe > Cu > Cr > Pb > Cd > Hg gibi benzer bir dağılım söz konusudur. Kazara yutulma sonucunda maruziyet yani sindirim ise ana maruziyet yolu olarak ön plana çıkmıştır.

3.2.2. Proses Atıksuları (Process Wastewaters)

Atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanan atıksulardaki metallere günlük potansiyel maruziyet değerleri Eş. 1-3 kullanılarak hesaplanmıştır. Sindirim ve solunum yolu için hesaplanan günlük

Tablo 9. Atıksularda bulunan ağır metaller için Günlük Ortalama Doz Değerleri (GDD, $\text{mg kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$)
(The average daily dose (ADD) of heavy metals in wastewater ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$))

Ağır Metal		Yetişkin			Çocuk		
		GDD _{Sindirim}	GDD _{Solunum}	GDD _{Yetişkin}	GDD _{Sindirim}	GDD _{Solunum}	GDD _{Çocuk}
Cu	Aralık	$1,64 \times 10^{-8} - 5,7 \times 10^{-6}$	$2,42 \times 10^{-12} - 8,38 \times 10^{-10}$	$1,64 \times 10^{-8} - 5,7 \times 10^{-6}$	$1,44 \times 10^{-7} - 4,99 \times 10^{-5}$	$4,02 \times 10^{-12} - 1,39 \times 10^{-9}$	$1,44 \times 10^{-7} - 4,99 \times 10^{-5}$
	Ortalama	$7,02 \times 10^{-7}$	$1,03 \times 10^{-3}$	$7,02 \times 10^{-7}$	$6,14 \times 10^{-6}$	$1,72 \times 10^{-10}$	$6,14 \times 10^{-6}$
	LCL	$2,73 \times 10^{-7}$	$4,02 \times 10^{-11}$	$2,73 \times 10^{-7}$	$2,39 \times 10^{-6}$	$6,68 \times 10^{-11}$	$2,39 \times 10^{-6}$
	UCL	$1,13 \times 10^{-6}$	$1,66 \times 10^{-10}$	$1,13 \times 10^{-6}$	$9,89 \times 10^{-6}$	$2,76 \times 10^{-10}$	$9,89 \times 10^{-6}$
Hg	Aralık	$1,37 \times 10^{-10} - 3,42 \times 10^{-8}$	$2,01 \times 10^{-14} - 5,04 \times 10^{-12}$	$1,37 \times 10^{-10} - 3,43 \times 10^{-8}$	$1,20 \times 10^{-9} - 3,0 \times 10^{-7}$	$3,35 \times 10^{-14} - 8,37 \times 10^{-12}$	$1,20 \times 10^{-9} - 3,0 \times 10^{-7}$
	Ortalama	$3,82 \times 10^{-9}$	$5,62 \times 10^{-13}$	$3,82 \times 10^{-9}$	$3,34 \times 10^{-8}$	$9,34 \times 10^{-13}$	$3,34 \times 10^{-8}$
	LCL	$1,27 \times 10^{-9}$	$1,86 \times 10^{-13}$	$1,27 \times 10^{-9}$	$1,11 \times 10^{-8}$	$3,10 \times 10^{-13}$	$1,11 \times 10^{-8}$
	UCL	$6,37 \times 10^{-9}$	$9,37 \times 10^{-13}$	$6,37 \times 10^{-9}$	$5,58 \times 10^{-8}$	$1,56 \times 10^{-12}$	$5,58 \times 10^{-8}$
Fe	Aralık	$6,85 \times 10^{-7} - 3,04 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-10} - 4,47 \times 10^{-9}$	$6,85 \times 10^{-7} - 3,04 \times 10^{-5}$	$5,99 \times 10^{-6} - 2,66 \times 10^{-4}$	$1,67 \times 10^{-10} - 7,44 \times 10^{-9}$	$5,99 \times 10^{-6} - 2,66 \times 10^{-4}$
	Ortalama	$3,42 \times 10^{-6}$	$5,04 \times 10^{-10}$	$3,43 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-5}$	$8,37 \times 10^{-10}$	$3,0 \times 10^{-5}$
	LCL	$8,36 \times 10^{-7}$	$1,23 \times 10^{-10}$	$8,36 \times 10^{-7}$	$7,32 \times 10^{-6}$	$2,04 \times 10^{-10}$	$7,32 \times 10^{-6}$
	UCL	$6,01 \times 10^{-6}$	$8,84 \times 10^{-10}$	$6,01 \times 10^{-6}$	$5,26 \times 10^{-5}$	$1,47 \times 10^{-9}$	$5,26 \times 10^{-5}$
Cd	Aralık	$1,37 \times 10^{-10} - 1,37 \times 10^{-7}$	$2,01 \times 10^{-14} - 2,01 \times 10^{-11}$	$1,37 \times 10^{-10} - 1,37 \times 10^{-7}$	$1,20 \times 10^{-9} - 1,20 \times 10^{-6}$	$3,35 \times 10^{-14} - 3,35 \times 10^{-11}$	$1,20 \times 10^{-9} - 1,20 \times 10^{-6}$
	Ortalama	$9,35 \times 10^{-8}$	$1,37 \times 10^{-11}$	$9,35 \times 10^{-8}$	$8,18 \times 10^{-7}$	$2,29 \times 10^{-11}$	$8,18 \times 10^{-7}$
	LCL	$6,77 \times 10^{-8}$	$9,95 \times 10^{-12}$	$6,77 \times 10^{-8}$	$5,92 \times 10^{-7}$	$1,65 \times 10^{-11}$	$5,92 \times 10^{-7}$
	UCL	$1,19 \times 10^{-7}$	$1,76 \times 10^{-11}$	$1,19 \times 10^{-7}$	$1,04 \times 10^{-6}$	$2,92 \times 10^{-11}$	$1,04 \times 10^{-6}$
Pb	Aralık	$5,21 \times 10^{-9} - 3,52 \times 10^{-7}$	$7,66 \times 10^{-13} - 5,18 \times 10^{-11}$	$5,21 \times 10^{-9} - 3,52 \times 10^{-7}$	$4,55 \times 10^{-8} - 3,08 \times 10^{-6}$	$1,27 \times 10^{-12} - 8,61 \times 10^{-11}$	$4,55 \times 10^{-8} - 3,08 \times 10^{-6}$
	Ortalama	$1,21 \times 10^{-7}$	$1,77 \times 10^{-11}$	$1,21 \times 10^{-7}$	$1,06 \times 10^{-6}$	$2,96 \times 10^{-11}$	$1,06 \times 10^{-6}$
	LCL	$9,16 \times 10^{-8}$	$1,35 \times 10^{-11}$	$9,16 \times 10^{-8}$	$8,01 \times 10^{-7}$	$2,24 \times 10^{-11}$	$8,01 \times 10^{-7}$
	UCL	$1,50 \times 10^{-7}$	$2,21 \times 10^{-11}$	$1,50 \times 10^{-7}$	$1,31 \times 10^{-6}$	$3,67 \times 10^{-11}$	$1,31 \times 10^{-6}$
Cr	Aralık	$3,97 \times 10^{-9} - 3,77 \times 10^{-7}$	$5,84 \times 10^{-13} - 5,54 \times 10^{-11}$	$3,97 \times 10^{-9} - 3,77 \times 10^{-7}$	$3,48 \times 10^{-8} - 3,30 \times 10^{-6}$	$9,71 \times 10^{-13} - 9,21 \times 10^{-11}$	$3,48 \times 10^{-8} - 3,3 \times 10^{-6}$
	Ortalama	$1,17 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-11}$	$1,17 \times 10^{-7}$	$1,03 \times 10^{-6}$	$2,87 \times 10^{-11}$	$1,03 \times 10^{-6}$
	LCL	$8,81 \times 10^{-8}$	$1,30 \times 10^{-11}$	$8,81 \times 10^{-8}$	$7,71 \times 10^{-7}$	$2,15 \times 10^{-11}$	$7,71 \times 10^{-7}$
	UCL	$1,47 \times 10^{-7}$	$2,16 \times 10^{-11}$	$1,47 \times 10^{-7}$	$1,28 \times 10^{-6}$	$3,59 \times 10^{-11}$	$1,28 \times 10^{-6}$
Toplam Siyanür	Aralık	$3,7 \times 10^{-6} - 1,24 \times 10^{-2}$	$5,44 \times 10^{-10} - 1,83 \times 10^{-6}$	$3,70 \times 10^{-6} - 1,24 \times 10^{-2}$	$3,24 \times 10^{-5} - 1,09 \times 10^{-1}$	$9,04 \times 10^{-10} - 3,04 \times 10^{-6}$	$3,24 \times 10^{-5} - 1,09 \times 10^{-1}$
	Ortalama	$1,25 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-7}$	$1,25 \times 10^{-3}$	$1,10 \times 10^{-2}$	$3,06 \times 10^{-7}$	$1,10 \times 10^{-2}$
	LCL	$2,10 \times 10^{-4}$	$3,09 \times 10^{-8}$	$2,10 \times 10^{-4}$	$1,84 \times 10^{-3}$	$5,13 \times 10^{-8}$	$1,84 \times 10^{-3}$
	UCL	$2,29 \times 10^{-3}$	$3,37 \times 10^{-7}$	$2,30 \times 10^{-3}$	$2,01 \times 10^{-2}$	$5,61 \times 10^{-7}$	$2,01 \times 10^{-2}$

maruziyet değerleri, üst güven sınırı (UCL) ve alt güven sınırı (LCL) ile birlikte Tablo 9'da verilmiştir. Ortalama GDD, UCL ve LCL değerlerine göre ağır metaller yetişkinler için toplam siyanür > Fe > Cu > Pb > Cr > Pb > Hg olarak sıralanmaktadır. Çocuklar içinde toplam siyanür > Fe > Cu > Pb > Cr > Cd > Hg gibi benzer bir dağılım söz konusudur. Bununla birlikte hem ortalama hem de UCL ve LCL değerlerine göre tüm yetişkinler ve çocuklar için en yüksek GDD değerleri toplam siyanür, Fe ve Cu parametreleri için kaydedilirken, bu sıralamayı Pb, Cr ve Cd takip etmiş ve en düşük değerler de Hg için hesaplanmıştır. Çocuklar için hesaplanan tüm potansiyel kirlenici maruziyet değerleri ise yetişkinlere göre çok daha yüksektir. Ayrıca, çocukların toplam ortalama ağır metal maruziyetleri sindirim ve solunum için yetişkinlere kıyasla 8,75 ve 1,66 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Diğer çalışmalarda da çocuklardaki potansiyel ağır metal maruziyetlerinin yetişkinlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiş ve zararlı etkilerin çocuklarda daha ciddi olduğu öngörülmüştür [50, 63, 68, 95]. Bu bulgunun, çocukların vücut ağırlıklarının yetişkinlere göre daha az olması ve yetişkinlerle karşılaştırıldığında çocukların açık hava etkinliklerine daha sık katılması olduğu düşünülmektedir [50].

Kirlenici maruziyet yolları karşılaştırıldığında; sindirim yoluyla maruziyetin solunum yoluyla maruziyete kıyasla daha önemli olduğu (sindirim > solunum) tespit edilmiştir. Bu bulgu diğer araştırmacıların bulgularıyla da tutarlıdır [50, 84, 96, 97].

3.3.1. Kanserojen Olmayan Kronik Sağlık Riski (Chronic Non-Carcinogenic Health Risk)

3.3.1.1. Arıtılmış Atıksular (Treated Wastewaters)

Yetişkinler ve çocukların potansiyel sağlık risk değerlendirmesi için arıtılmış atıksuların hem sindirim hem de solunum yoluyla alımı dikkate alınmıştır. Yetişkinler için ortalama TK değerleri Cu, Hg, Fe, Cd, Pb, Cr ve toplam siyanür için sırasıyla $1,94 \times 10^{-6}$, $4,57 \times 10^{-7}$, $1,21 \times 10^{-5}$, $1,37 \times 10^{-7}$, $2,51 \times 10^{-6}$, $3,55 \times 10^{-6}$ ve $1,95 \times 10^{-3}$ 'tür. Çocuklar için ortalama değerler ise sırasıyla $1,70 \times 10^{-5}$, $4,00 \times 10^{-6}$, $9,17 \times 10^{-5}$, $1,20 \times 10^{-6}$, $2,20 \times 10^{-5}$, $3,10 \times 10^{-5}$ ve $9,62 \times 10^{-3}$ 'dir. Alınan örnekler bazında, çocuklar için TK değerleri yetişkinlere göre daha yüksektir. Çocuklar için maksimum ve minimum değerler Cu için $3,00 \times 10^{-6}$ - $3,30 \times 10^{-5}$, Hg için $4,00 \times 10^{-6}$, Fe için $1,16 \times 10^{-5}$ - $2,08 \times 10^{-4}$, Cd için $5,99 \times 10^{-7}$ - $1,80 \times 10^{-6}$, Pb için $5,99 \times 10^{-6}$ - $3,00 \times 10^{-5}$, Cr için $1,32 \times 10^{-5}$ - $4,00 \times 10^{-5}$ ve toplam siyanür için de 0,0001- 0,4645'dir.

Ortalama TK değerlerinin 1'in altında olması, hem yetişkinler hem de çocuklar için sağlık açısından potansiyel risklerin bulunmadığını göstermektedir. TK değerlerinin sınır değerin altında olması kanser dışı (enfeksiyonlar, diyabet vb.) potansiyel sağlık risklerinin bulunmadığını ifade etmektedir [98]. Elde edilen sonuçlar, atıksu arıtma tesislerinin etkin işletilmesinin, atıksu deşarjında standart

Tablo 10. Ağır metaller maruziyet nedeniyle insanlar (yetişkin ve çocuk) için kanserojen olmayan risklerin Tehlike Katsayıları (TK) (Non-carcinogenic risks for humans (adults and children) due to exposure to heavy metals of hazard quotient)

Ağır Metal		Yetişkin			Çocuk		
		TKSindirim	TKSolunum	TKYetişkin	TKSindirim	TKSolunum	TKÇocuk
Cu	Aralık	$4,11 \times 10^{-7} - 1,42 \times 10^{-4}$	$6,01 \times 10^{-11} - 2,08 \times 10^{-8}$	$4,11 \times 10^{-7} - 1,42 \times 10^{-4}$	$3,60 \times 10^{-6} - 1,25 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-10} - 3,47 \times 10^{-8}$	$3,60 \times 10^{-6} - 1,25 \times 10^{-3}$
	Ortalama	$1,75 \times 10^{-5}$	$2,56 \times 10^{-9}$	$1,76 \times 10^{-5}$	$1,54 \times 10^{-4}$	$4,36 \times 10^{-9}$	$1,53 \times 10^{-4}$
	LCL	$6,83 \times 10^{-6}$	$9,99 \times 10^{-10}$	$6,83 \times 10^{-6}$	$6,17 \times 10^{-5}$	$1,71 \times 10^{-9}$	$6,17 \times 10^{-5}$
	UCL	$2,83 \times 10^{-5}$	$4,14 \times 10^{-9}$	$2,83 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-4}$	$7,02 \times 10^{-9}$	$2,45 \times 10^{-4}$
Hg	Aralık	$4,57 \times 10^{-7} - 1,14 \times 10^{-4}$	$2,01 \times 10^{-10} - 5,04 \times 10^{-8}$	$4,57 \times 10^{-7} - 1,14 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-6} - 9,99 \times 10^{-4}$	$3,35 \times 10^{-10} - 8,37 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-6} - 9,99 \times 10^{-4}$
	Ortalama	$1,27 \times 10^{-5}$	$6,04 \times 10^{-9}$	$1,27 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$9,45 \times 10^{-9}$	$1,11 \times 10^{-4}$
	LCL	$4,22 \times 10^{-6}$	$1,86 \times 10^{-9}$	$4,22 \times 10^{-6}$	$3,84 \times 10^{-5}$	$3,08 \times 10^{-9}$	$3,84 \times 10^{-5}$
	UCL	$2,12 \times 10^{-5}$	$9,37 \times 10^{-9}$	$2,12 \times 10^{-5}$	$1,84 \times 10^{-4}$	$1,58 \times 10^{-8}$	$1,84 \times 10^{-4}$
Fe	Aralık	$2,28 \times 10^{-6} - 1,01 \times 10^{-4}$	$4,58 \times 10^{-7} - 2,03 \times 10^{-5}$	$2,74 \times 10^{-6} - 1,22 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-5} - 8,87 \times 10^{-4}$	$7,61 \times 10^{-7} - 3,38 \times 10^{-5}$	$2,07 \times 10^{-5} - 9,21 \times 10^{-4}$
	Ortalama	$1,14 \times 10^{-5}$	$2,29 \times 10^{-6}$	$1,37 \times 10^{-5}$	$9,98 \times 10^{-5}$	$3,90 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-4}$
	LCL	$2,79 \times 10^{-6}$	$5,59 \times 10^{-7}$	$3,35 \times 10^{-6}$	$2,59 \times 10^{-5}$	$9,69 \times 10^{-7}$	$2,69 \times 10^{-5}$
	UCL	$2,00 \times 10^{-5}$	$4,02 \times 10^{-6}$	$2,40 \times 10^{-5}$	$1,74 \times 10^{-4}$	$6,83 \times 10^{-6}$	$1,81 \times 10^{-4}$
Cd	Aralık	$1,37 \times 10^{-7} - 1,37 \times 10^{-4}$	$2,01 \times 10^{-11} - 2,01 \times 10^{-8}$	$1,37 \times 10^{-7} - 1,37 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-6} - 1,2 \times 10^{-3}$	$3,35 \times 10^{-11} - 3,35 \times 10^{-8}$	$1,20 \times 10^{-6} - 1,20 \times 10^{-3}$
	Ortalama	$9,35 \times 10^{-5}$	$1,37 \times 10^{-8}$	$9,35 \times 10^{-5}$	$8,18 \times 10^{-4}$	$2,38 \times 10^{-8}$	$8,18 \times 10^{-4}$
	LCL	$6,77 \times 10^{-5}$	$9,95 \times 10^{-9}$	$6,77 \times 10^{-5}$	$5,97 \times 10^{-4}$	$1,76 \times 10^{-8}$	$5,97 \times 10^{-4}$
	UCL	$1,19 \times 10^{-4}$	$1,76 \times 10^{-8}$	$1,19 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-8}$	$1,04 \times 10^{-3}$
Pb	Aralık	$1,30 \times 10^{-6} - 8,8 \times 10^{-5}$	$2,17 \times 10^{-10} - 1,47 \times 10^{-8}$	$1,30 \times 10^{-6} - 8,80 \times 10^{-5}$	$1,14 \times 10^{-5} - 7,7 \times 10^{-4}$	$3,62 \times 10^{-10} - 2,45 \times 10^{-8}$	$1,14 \times 10^{-5} - 7,70 \times 10^{-4}$
	Ortalama	$3,02 \times 10^{-5}$	$5,04 \times 10^{-9}$	$3,02 \times 10^{-5}$	$2,64 \times 10^{-4}$	$8,67 \times 10^{-9}$	$2,64 \times 10^{-4}$
	LCL	$2,29 \times 10^{-5}$	$3,83 \times 10^{-9}$	$2,29 \times 10^{-5}$	$2,02 \times 10^{-4}$	$6,66 \times 10^{-9}$	$2,02 \times 10^{-4}$
	UCL	$3,75 \times 10^{-5}$	$6,27 \times 10^{-9}$	$3,76 \times 10^{-5}$	$3,27 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^{-8}$	$3,27 \times 10^{-4}$
Cr	Aralık	$1,32 \times 10^{-6} - 1,26 \times 10^{-4}$	$1,17 \times 10^{-10} - 1,11 \times 10^{-8}$	$1,32 \times 10^{-6} - 1,26 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-5} - 1,1 \times 10^{-3}$	$1,94 \times 10^{-10} - 1,84 \times 10^{-8}$	$1,16 \times 10^{-5} - 1,10 \times 10^{-3}$
	Ortalama	$3,91 \times 10^{-5}$	$3,45 \times 10^{-9}$	$3,91 \times 10^{-5}$	$3,42 \times 10^{-4}$	$5,89 \times 10^{-9}$	$3,42 \times 10^{-4}$
	LCL	$2,94 \times 10^{-5}$	$2,59 \times 10^{-9}$	$2,94 \times 10^{-5}$	$2,59 \times 10^{-4}$	$4,46 \times 10^{-9}$	$2,59 \times 10^{-4}$
	UCL	$4,89 \times 10^{-5}$	$4,31 \times 10^{-9}$	$4,89 \times 10^{-5}$	$4,26 \times 10^{-4}$	$7,32 \times 10^{-9}$	$4,26 \times 10^{-4}$
Toplam Siyanür	Aralık	$5,87 \times 10^{-3} - 1,97 \times 10^{-1}$	$2,72 \times 10^{-4} - 9,14 \times 10^{-1}$	$0,01 - 2,06 \times 10^{-1}$	$5,14 \times 10^{-2} - 1,73 \times 10^{-2}$	$4,52 \times 10^{-4} - 1,52 \times 10^{-2}$	$0,05 - 1,74 \times 10^{-2}$
	Ortalama	$1,99$	$9,21 \times 10^{-2}$	$2,08$	$1,74 \times 10^{-1}$	$9,61 \times 10^{-2}$	$1,75 \times 10^{-1}$
	LCL	$3,33 \times 10^{-1}$	$1,54 \times 10^{-2}$	$3,49 \times 10^{-1}$	$3,21$	$3,77 \times 10^{-2}$	$3,24$
	UCL	$3,64$	$1,69 \times 10^{-1}$	$3,81$	$3,16 \times 10^{-1}$	$1,55 \times 10^{-1}$	$3,17 \times 10^{-1}$
Tİ	Ortalama		$2,08$			$1,75 \times 10^{-1}$	

kaliteyi sağlamak açısından ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır. İnsan sağlığı üzerinde olumsuz bir etki beklenmemekle birlikte, artırılmış atıksuların yeniden kullanılması planlandığında, insan ve çevre sağlığı üzerindeki etkilerin daha ayrıntılı araştırılması gerekmektedir [91].

3.3.1.2. Proses Atıksuları (Process Wastewaters)

Ağır metallerle sindirim ve solunum yoluyla maruz kalmanın kanserojen olmayan TK değerleri Tablo 10'da verilmiştir. Siyanür parametresinin yüksek konsantrasyon da bulunması sebebiyle diğer parametrelere kıyasla potansiyel olarak daha yüksek kanserojen olmayan risk gösterebileceği tahmin edilmiştir. Aynı zamanda tehlike katsayılarının ortalama değerleri de dikkate alındığında siyanür parametresi yetişkin ve çocuklar için Tİ değerinin neredeyse %100'ünü oluşturmaktadır. Buna göre TK değerleri yetişkin ve çocuklar için sırasıyla siyanür > Cd > Cr > Pb > Cu > Fe > Hg şeklinde sıralanmaktadır. Aynı zamanda TK değerleri dikkate alındığında siyanür parametresi dışında tüm metallerin hem sindirim hem de solunum için TK değerleri 1'in altındadır. Bu sonuçlar Cd, Cr, Pb, Cu, Fe ve Hg parametrelerinin hem yetişkin hem de çocuklarda yutma veya solunum yoluyla potansiyel olarak kanserojen olmayan riske sebep olmayacağını göstermektedir. Buna karşın, siyanür parametresi sindirim yoluyla hem yetişkinler hem de çocuklarda kanserojen olmayan riske sebep olma potansiyeline sahiptir.

Yetişkinlere ilişkin hesaplanan değerler çocuklarla karşılaştırıldığında, çocuklar için TK değerleri daha yüksektir, bu da çocukların kirleticilere tepki verme kapasitelerinin, aynı kirleticilere maruz kalmaları durumunda yetişkinlerden daha zayıf olduğunu göstermektedir [50]. Yetişkinler için hesaplanan Tİ değeri 2,08 ve çocuklar için de 17,5'dir. Bu sonuçlar hem yetişkinler hem de çocuklar için potansiyel kanserojen olmayan risklerin mevcut olabileceğini göstermektedir. Ancak, kesin sonuçlara ulaşabilmesi için bu alanda yapılacak daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Verilerin karşılaştırılması amacıyla yetişkinler ve çocuklar için kanserojen olmayan risklere ilişkin TK katsayıları Şekil 1'de grafiksel olarak sunulmuştur. Yetişkinler ve çocuklar arasındaki farklar göz önünde bulundurulduğunda, çocukların daha hassas oldukları ve çevresel risklere karşı da daha yüksek bir duyarlılık gösterdikleri grafikten de görülmektedir. Şekil 1 ve Tablo 10 birlikte değerlendirildiğinde çocuklar için çoğu ağır metal TK değeri, yetişkin değerlerine kıyasla belirgin şekilde daha yüksektir. Grafikteki UCL ve LCL değerleri de, çocukların maruziyet aralıklarının daha geniş olduğunu ve bu durum onların daha büyük değişkenliğe sahip olduklarını ortaya koymaktadır. Yetişkinlerde ise, TK değerlerinin daha dar bir aralıkta ve genellikle daha düşük olduğu görülmekte olup,

bu da yetişkinlerin bu metallerle daha iyi başa çıkabildiğini, ancak yine de maruziyetlerin sınırlı tutulması gerektiğini işaret etmektedir [99]. Bununla birlikte, kirleticilerin varlığından kaynaklanabilecek potansiyel sağlık riskleri değerlendirirken, elde edilen sonuçların kesin ve mutlak olarak kabul edilemeyeceği unutulmamalıdır. Bu sonuçlar, hesaplamalar doğrultusunda yapılan tahminler olup, çevresel faktörler, bireysel sağlık durumları, maruz kalma süreleri ve diğer etkenler göz önünde bulundurulduğunda, daha kapsamlı çalışmalarla desteklenmeleri gerekmektedir.

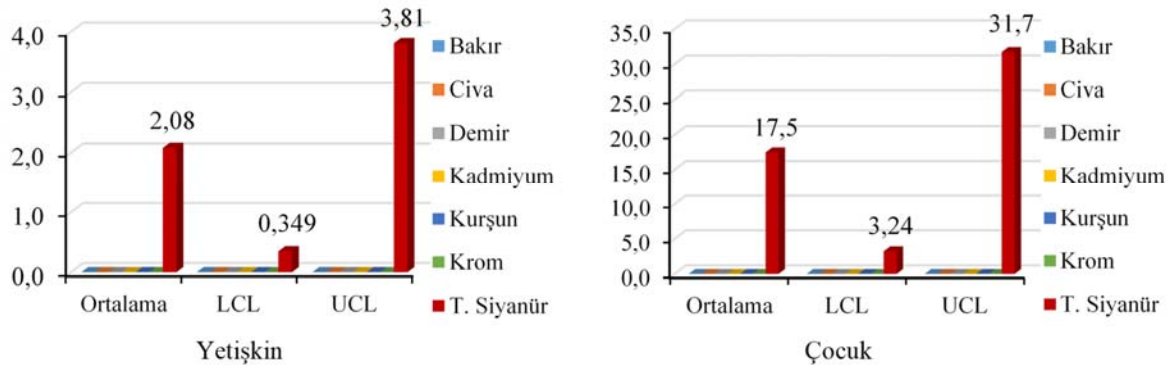
3.3.2. Kanserijenik Sağlık Riski (Carcinogenic Health Risk)

3.3.2.1. Arıtılmış Atıksular (Treated Wastewaters)

RİSK, potansiyel bir kanserojene maruz kalınması durumunda, bireyin yaşamı boyunca kansere yakalanma olasılığının artışı olarak hesaplanmaktadır. Arıtılmış atıksu örneklerinde, her iki grup için de potansiyel kanserojen risklerin değerlendirmesi amacıyla Cd, Pb ve Cr metalleri için RİSK değerleri hesaplanmıştır. Diğer kirleticiler içinse KEF değerlerinin mevcut olmaması nedeniyle hesaplama yapılamamıştır. Toplam RİSK değerleri, yetişkinler için $6,28 \times 10^{-9}$ ve çocuklar içinse $5,49 \times 10^{-8}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler düşük olarak değerlendirilmekte olup, kanser oluşma risk potansiyelinin de son derece az olduğunu göstermektedir [100]. Sonuç olarak, her iki durumda da RİSK değerleri 10^{-4} 'ten düşük olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, dikkate alınan AAT'ler için yapılan hesaplamalar, $RİSK_{Sindirim} > RİSK_{Solunum}$ ilişkisini ortaya koymuştur.

3.3.2.2. Proses Atıksuları (Process Wastewaters)

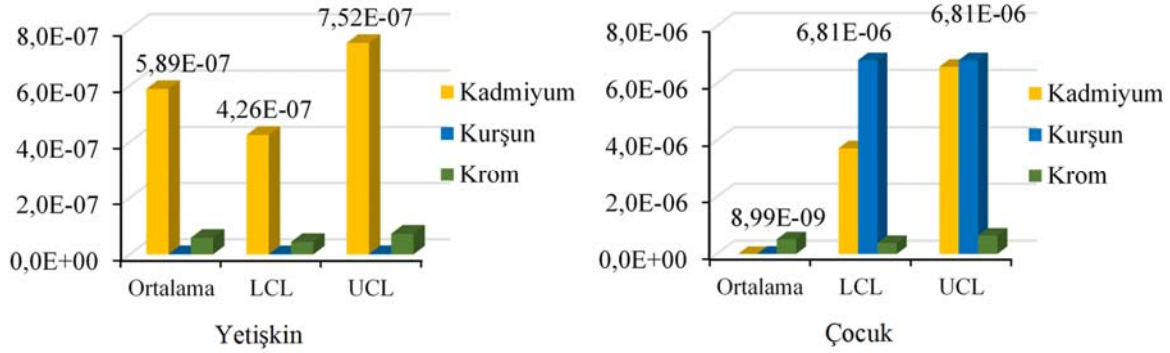
Proses atıksularının potansiyel kanserojenik risklerini değerlendirmek amacıyla, Cr, Pb ve Cd gibi metaller için sindirim ve solunum yoluyla olası maruz kalma riskleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, bu metallerin potansiyel etkilerini ve maruz kalma yollarını dikkate alarak, hangi durumlarda riskin arttığını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, Tablo 11'de özetlenmiştir. Tablo 11'de görüldüğü üzere, potansiyel ortalama kanserojen risk değerleri yetişkinler için $6,49 \times 10^{-7}$ ve çocuklar için de $5,25 \times 10^{-7}$ olarak hesaplanmıştır. Ortalama değerler, UCL ve LCL dikkate alındığında 1×10^{-4} güvenli sınır değerini aşılmadığı görülmektedir [50]. Bu sonuçlar, potansiyel maruziyet durumunda hem yetişkinlerin hem de çocukların kanserojen risk taşımadığını göstermektedir. Ayrıca, genel olarak RİSK değerleri karşılaştırıldığında, $RİSK_{Sindirim}$ değerleri $RİSK_{Solunum}$ değerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, potansiyel maruziyet durumunda sindirim maruziyet yolunun yine birincil yol olduğunu ortaya koymaktadır. Potansiyel kanserojen riskin, hem yetişkinler hem de çocuklar için önemli bir tehdit oluşturmadığı Şekil 2'de açıkça görülmektedir.



Şekil 1. Yetişkinler ve çocuklar için kanserojen olmayan potansiyel risklere ilişkin TK değerleri
(The HQs for non-carcinogenic potential risks for adults and children)

Tablo 11. Yetişkin ve çocuklar için kanserojenik sağlık riski (Carcinogenic health risks for adults and children)

Ağır Metal		Yetişkin			Çocuk		
		RİSK _{Sindirim}	RİSK _{Solunum}	RİSK _{Yetişkin}	RİSK _{Sindirim}	RİSK _{Solunum}	RİSK _{Çocuk}
Cd	Aralık	$8,63 \times 10^{-10}$ – $8,63 \times 10^{-7}$	$1,27 \times 10^{-13}$ – $5,44 \times 10^{-6}$	$8,63 \times 10^{-10}$ – $8,63 \times 10^{-7}$	$7,55 \times 10^{-9}$ – $7,55 \times 10^{-6}$	$2,11 \times 10^{-13}$ – $2,11 \times 10^{-10}$	$7,55 \times 10^{-9}$ – $7,55 \times 10^{-6}$
	Ortalama	$5,89 \times 10^{-7}$	$8,67 \times 10^{-11}$	$5,89 \times 10^{-7}$	$5,16 \times 10^{-6}$	$1,44 \times 10^{-10}$	$9,08 \times 10^{-10}$
	LCL	$4,26 \times 10^{-7}$	$6,27 \times 10^{-11}$	$4,26 \times 10^{-7}$	$3,73 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-10}$	$3,73 \times 10^{-6}$
	UCL	$7,52 \times 10^{-7}$	$1,11 \times 10^{-10}$	$7,52 \times 10^{-7}$	$6,58 \times 10^{-6}$	$1,84 \times 10^{-10}$	$6,58 \times 10^{-6}$
Pb	Aralık	$4,42 \times 10^{-11}$ – $2,99 \times 10^{-9}$	$6,51 \times 10^{-15}$ – $4,40 \times 10^{-13}$	$4,43 \times 10^{-11}$ – $2,99 \times 10^{-9}$	$3,87 \times 10^{-10}$ – $2,62 \times 10^{-8}$	$1,08 \times 10^{-14}$ – $7,32 \times 10^{-13}$	$3,87 \times 10^{-10}$ – $2,62 \times 10^{-8}$
	Ortalama	$1,03 \times 10^{-9}$	$1,51 \times 10^{-13}$	$1,03 \times 10^{-9}$	$8,99 \times 10^{-9}$	$2,51 \times 10^{-13}$	$8,99 \times 10^{-9}$
	LCL	$7,78 \times 10^{-10}$	$1,14 \times 10^{-13}$	$7,78 \times 10^{-10}$	$6,81 \times 10^{-9}$	$1,90 \times 10^{-13}$	$6,81 \times 10^{-9}$
	UCL	$1,28 \times 10^{-9}$	$1,88 \times 10^{-13}$	$1,28 \times 10^{-9}$	$1,12 \times 10^{-8}$	$3,12 \times 10^{-13}$	$6,81 \times 10^{-9}$
Cr	Aralık	$1,99 \times 10^{-9}$ – $1,89 \times 10^{-7}$	$2,93 \times 10^{-13}$ – $2,78 \times 10^{-11}$	$1,99 \times 10^{-9}$ – $1,89 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-8}$ – $1,65 \times 10^{-6}$	$8,72 \times 10^{-9}$ – $8,27 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-8}$ – $1,65 \times 10^{-6}$
	Ortalama	$5,88 \times 10^{-8}$	$8,65 \times 10^{-12}$	$5,88 \times 10^{-8}$	$5,15 \times 10^{-7}$	$2,58 \times 10^{-7}$	$5,15 \times 10^{-7}$
	LCL	$4,41 \times 10^{-8}$	$6,49 \times 10^{-12}$	$4,41 \times 10^{-8}$	$3,86 \times 10^{-7}$	$1,08 \times 10^{-11}$	$3,86 \times 10^{-7}$
	UCL	$7,35 \times 10^{-8}$	$1,08 \times 10^{-11}$	$7,35 \times 10^{-8}$	$6,43 \times 10^{-7}$	$1,08 \times 10^{-11}$	$6,43 \times 10^{-7}$
RİSK	Ortalama		$6,49 \times 10^{-7}$			$5,25 \times 10^{-7}$	

**Şekil 2.** Yetişkinler ve çocuklar için kanserojen risklere yönelik potansiyel RİSK değerleri (Potential RISK values for carcinogenic risks in adults and children)

Şekil 2 incelendiğinde, Cd için yetişkinler ve çocuklar arasında belirgin farklar gözlemlenmektedir. Yetişkinler için, Cd'ye sindirim yoluyla potansiyel maruziyet, $5,89 \times 10^{-7}$ gibi risk değeri ile daha yüksek çıkarken, solunum yoluyla alınan risk ise çok daha düşük olup, $8,67 \times 10^{-11}$ seviyesindedir. Bu durum yine de Cd'ye hem sindirim hem de solunum yoluyla maruz kalırsa bile, potansiyel kanserojen riskin 1×10^{-4} sınır değerinin aşılmadığını ve ciddi bir risk oluşturmadığını göstermektedir. Çocuklar içinse sindirim yoluyla potansiyel maruziyet çok daha yüksek yani $5,16 \times 10^{-6}$ seviyesindeyken, solunum yoluyla alınan risk ise $1,44 \times 10^{-10}$ olarak hesaplanmıştır. Yetişkinlere kıyasla çocuklar için sindirim yoluyla potansiyel risk çok daha yüksek olsa da her iki durumda da 1×10^{-4} sınırı aşılmamaktadır. Bu da potansiyel maruziyetin kanserojenik risk taşımadığını göstermektedir. Genel olarak hem yetişkinler hem de çocuklar için olası kadmiyum maruziyeti önemli bir kanserojenik risk taşımamaktadır.

Pb ve Cr için yapılan potansiyel maruziyet riski hesaplamaları da hem yetişkinler hem de çocuklar için farklı sonuçlar ortaya koymaktadır. Pb için, yetişkinlerin sindirim yoluyla potansiyel maruziyeti $1,03 \times 10^{-9}$, solunum yoluyla ise $1,51 \times 10^{-13}$ olarak hesaplanmıştır. Çocuklar içinse, sindirim yoluyla potansiyel maruziyet $8,99 \times 10^{-9}$, solunum yoluyla ise $2,51 \times 10^{-13}$ olarak hesaplanmıştır. Yetişkinlere kıyasla çocuklar için Pb'ye potansiyel maruziyet biraz daha yüksek olsa da, her iki grup için de hesaplanan risk değerleri 1×10^{-4} sınırının çok altında kalmaktadır, bu da Pb'nin potansiyel olarak kanserojen bir risk taşımadığını göstermektedir.

Cr için yapılan hesaplamalar da benzer bir durumu ortaya koymaktadır. Yetişkinler için, sindirim yoluyla potansiyel maruziyet $5,88 \times 10^{-8}$, solunum yoluyla ise $8,65 \times 10^{-12}$ olarak hesaplanmıştır. Çocuklar için bu değerler $5,15 \times 10^{-7}$ ve $2,58 \times 10^{-7}$ olarak belirlenmiştir. Yetişkinlere göre çocuklar için Cr maruziyeti potansiyel olarak daha yüksek olsa da, her iki grup için de UCL ve LCL değerleri 1×10^{-4} sınırını aşmamaktadır. Bu da Cr'nin potansiyel olarak olası kanserojen bir risk taşımadığını göstermektedir.

Sonuç olarak, Cd, Pb ve Cr için yapılan potansiyel maruziyet hesaplamaları hem yetişkinler hem de çocuklar için kanserojenik riskin anlamlı bir tehdit oluşturmadığını ortaya koymuştur.

4. Sonuçlar (Conclusion)

Bu çalışma, atık yağ geri kazanım tesislerinden kaynaklanabilecek artılmış ve artılmamış atıksuların potansiyel sağlık risklerini değerlendiren ilk araştırma olma özelliği taşımaktadır. Araştırma kapsamında, su örneklerinde bulunan kirletici konsantrasyonları belirlenmiş, kirleticiler arasındaki olası ilişkiler istatistiksel olarak analiz edilmiş ve hem ham hem de arıtılmış atıksulara yönelik sağlık risk değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir.

Analizler sonucunda, atıksularda; siyanür ($2,7 - 9,075 \pm 1,864$ mg/l), Cu ($0,012 - 4,16 \pm 0,77$ mg/l), Hg ($0,0001 - 0,025 \pm 0,005$ mg/l), Cd ($0,0001 - 0,1 \pm 0,046$ mg/l), Pb ($0,0038 - 0,257 \pm 0,052$ mg/l) ve Cr ($0,0029 - 0,275 \pm 0,0524$ mg/l) gibi ağır metallerin yanı sıra $\text{NH}_4\text{-N}$

(0,2 – 1.979 ± 515 mg/l), AKM (8,0 – 3.398 ± 774 mg/l), fenol (2,2 – 356 ± 91,35 mg/l), hidrokarbonlar (13,7 – 532.450 ± 106.187 mg/l), KOİ (2.978 – 1.479.500 ± 343.804 mg/l) ve yağ-gres (56,75 – 582.175 ± 113.812 mg/l) tespit edilmiştir. Özellikle yağ-gres, hidrokarbonlar ve ağır metaller (özellikle Cu ve Fe, hidrokarbon ve yağ-gres) arasında güçlü pozitif korelasyonlar ($r^2 = 0,792-1,0$) saptanmıştır. Arıtılmış atıksularda ise, Cu (0,057 mg/l ± 0,050), Hg (<0,0001 mg/l), Fe (2,210 ± 2,498 mg/l), Cd (0,0001 mg/l ± 0,0001), Pb (0,007 mg/l ± 0,0046), Cr (0,008 mg/l ± 0,0039) ve toplam siyanür (0,501 mg/l ± 0,498) gibi kirleticilerin yasal deşarj limitlerini aşmadığı ve ortalama %89 (±5,4) arıtma veriminin sağlandığı belirlenmiştir.

Arıtılmış atıksuların sağlık risk analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla, TK değerleri yetişkinler için $1,94 \times 10^{-6}$ - $1,95 \times 10^{-3}$ ve çocuklar içinse $1,70 \times 10^{-5}$ - $9,62 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Ortalama TK değerlerinin 1'in altında olması, kanserojen olmayan sağlık riskleri açısından ciddi bir tehdit bulunmadığını göstermiştir. Benzer şekilde, potansiyel kanserojen risk değerlendirmesinde, yetişkinler için $6,28 \times 10^{-9}$ ve çocuklar içinse $5,49 \times 10^{-8}$ olarak hesaplanan toplam risk (RİSK) değerleri, kabul edilebilir sınır değer (10⁻⁴) oldukça altında olup, kanser oluşum potansiyelinin de son derece düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Atıksuların maruziyet değerlendirmesi sonuçları ise, siyanürün ana kirletici parametre olduğunu ve onu sırasıyla Fe, Cu, Pb ve Cr'nin izlediğini ortaya koymuştur. Çocuklarda GDD değerleri yetişkinlere kıyasla 8,75 ila 1,66 kat daha yüksek olup, kanserojen olmayan risk değerlendirmesinde TK değerleri siyanür > Cd > Cr > Pb > Cu > Fe > Hg olarak belirlenmiştir. Kanserojenik risk açısından yetişkinler için hesaplanan RİSK değerleri de $1,03 \times 10^{-9}$ ile $5,89 \times 10^{-7}$, çocuklar içinse $9,08 \times 10^{-10}$ ile $5,15 \times 10^{-7}$ arasında hesaplanmış olup, bu değerlerin kabul edilebilir sınır değerlerin altında kaldığı değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, siyanür ve ağır metallerin olası sağlık riskleri, özellikle çocuklar açısından önemli olup, bu grup hem kanserojen hem de kanserojen olmayan risklere karşı daha hassas kabul edilmektedir. Çocukların çevresel kirleticilere karşı daha savunmasız olduğu göz önüne alındığında, potansiyel maruziyetin azaltılması ve çocuklara yönelik koruyucu önlemlerin artırılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, atıksu arıtma süreçlerinin etkin bir biçimde uygulanmasına, kirlilik kaynaklarının en aza indirilmesine ve düzenli izleme programlarının oluşturulmasına devam edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, atıksuların insan sağlığı üzerindeki etkilerinin daha iyi ve doğru anlaşılabilmesi için gelecekte daha kapsamlı epidemiyolojik ve mevsimsel değişkenlikleri de içeren çok merkezli araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, çalışmada elde edilen bulgular yalnızca belirli bir örneklem ve sınırlı zaman dilimi ile ilişkili olduğundan; potansiyel risklere işaret eden bir sınırlı değerlendirme olarak ele alınmalıdır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, 53HRA04 Kodlu “Atık Yağ Rafinasyon Tesisleri Proses Yeterliliğinin Belirlenmesi Projesi” kapsamında üretilmiştir. Makale sürecinde verdiği değerli destek ve katkılar için Tuna PELİTLİ'ye teşekkür ederim.

Kaynaklar (References)

- Nowak, P., Kucharska, K., Kaminski, M., Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (16), 3002, 2019.
- Moses, K.K., Aliyu, A., Hamza, A., Mohammed-Dobo, I.A., Recycling of waste lubricating oil: A review of the recycling technologies with a focus on catalytic cracking, techno-economic and life cycle assessments, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 6, 111273, 2023.

- Mishra, A., Siddiqi, H., Kumari, U., Behera, I.D., Mukherjee, S., Meikap, B.C., Pyrolysis of waste lubricating oil/waste motor oil to generate high-grade fuel oil: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111446, 2021.
- Ufilyand, I.E., Zhinzilo, V.A., Burlakova, V.E., Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development, *Friction*, 7 (2), 93-116, 2019.
- Stout, S.A., Litman, E., Blue, D., Metal concentrations in used engine oils: Relevance to site assessments of soils, *Environmental Forensics*, 19 (3), 191-205, 2018.
- Pelitli, V., Doğan, Ö., Köroğlu, H. J., Waste oil management: Analyses of waste oils from vehicle crankcases and gearboxes, *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3 (1), 11–20, 2017.
- Ong, C.L., Jiang, X., Juan, J.C., Khaligh, N.G., Heidelberg, T., Ashless and non-corrosive disulfide compounds as excellent extreme pressure additives in naphthenic oil, *Journal of Molecular Liquids*, 351, 118553, 2022.
- Ossai, I.C., Hamid, F.S., Aboudi-Mana, S.C., Hassan, A., Ecotoxicological effects, human and animal health risks of pollution and exposure to waste engine oils: a review, *Environ Geochem Health* 46, 416, 2024.
- European Union. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj/eng>. Yayın tarihi Şubat 18, 2024. Erişim tarihi Ekim 22, 2024.
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Atık Yağlara İlişkin Atık Kodları ve Atık Yağ Grupları. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/12/20191221-1-1.pdf>. Yayın tarihi Aralık 21, 2019. Erişim tarihi Eylül 30, 2024.
- European Commission. A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF. Yayın tarihi Mart 11, 2020. Erişim tarihi Kasım 22, 2024.
- Pinheiro, C.T., Quina, M.J., Gando-Ferreira, L.C., Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51 (18), 2015–2050, 2021.
- Klenert, D., Garcia-Gutierrez, P., Tonini, D., Saveyn, H., Marschinski, R., The economics of waste oil recycling in the EU, *Journal of Environmental Economics and Policy*, 14, 1-22, 2023.
- Syahir, A.Z., Zulkifli, N.W.M., Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Alabdulkarem, A., Gulzar, M., Khuong, L.S., Harith, M.H., A review on bio-based lubricants and their applications, *Journal of Cleaner Production*, 168, 997-1016, 2017.
- Chen, H., Chow, C.L., Lau, D., Recycling used engine oil in concrete: Fire performance evaluation, *Journal of Building Engineering*, 64, 105637, 2023.
- Alfke, G., Bunch, G., Crociani, G., Dando, D., Fontaine, M., Goodsell, P., Green, A., Hafker, W., Isaak, G., Marvillet, J., Poot, B., Sutherland, H., Van Der Rest, A., Van Oudenhoven, J., Walden, T., Martin, E., Schipper, H., Best available techniques to reduce emissions from refineries, CONCAWE, Brussels, 1999.
- Sinha, P., Mukherji, S., Efficient treatment of secondary treated refinery wastewater using sand biofiltration: Removal of hazardous organic pollutants, *Water Research*, 259, 121874, 2024.
- Abuhasel, K., Kchaou, M., Alquraish, M., Munusamy, Y., Jeng, Y. T., Oily Wastewater Treatment: Overview of Conventional and Modern Methods, Challenges, and Future Opportunities, *Water*, 13 (7), 980, 2021.
- Aluyor, E.O., Ori-jesu, M., Biodegradation of mineral oils – A review, *African Journal of Biotechnology*, 8 (6), 915-920, 2009.
- Garrett, S., Vegetable Oil for Lubricating Chain Saws, United States Department of Agriculture Forest Service, 5100, 1-4, 1998.
- Neri, F., Foderi, C., Laschi, A., Fabiano, F., Cambi, M., Sciarra, G., Aprea, M.C., Cenni, A., Marchi, E., Determining exhaust fumes exposure in chainsaw operations, *Environmental Pollution*, 218, 1162-1169, 2016.
- Abosede, E.E., Effect of Crude Oil Pollution on some Soil Physical Properties, *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 6 (3), 14-17, 2013.
- Dmochowska, A., Dmochowski, D., Biedugnis, S., Charakterystyka biorekultywacji gleb skażonych produktami ropopochodnymi metodą pryzmowania ex situ, *Annual Set the Environment Protection*, 18, 759-771, 2016.

24. Makula, M.W., Zagro'zenie zanieczyszczenia 'srodowiska wodnego zwi'azkami ropopochodnymi, LAB Lab. Apar. Badania, 21 (1), 12-16, 2013.
25. MacAlister, C., Baggio, G., Perera, D., Qadir, M., Taing, L., Smakhtin, V., Global Water Security 2023 Assessment, United Nations University Institute for Water, Environment, and Health, Hamilton, Canada, 2023.
26. Tian, X., Song, Y., Shen, Z., Zhou, Y., Wang, K., Jin, X., Han, Z., Liu, T., A comprehensive review on toxic petrochemical wastewater pretreatment and advanced treatment, Journal of Cleaner Production, 245, 118692, 2020.
27. Grmasha, R.A., Stenger-Kovacs, C., Bedewy, B.A.H., Al-Sareji, O.J., Al-Juboori, R.A., Meiczinger, M., Hashim, K.S., Ecological and human health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in Tigris River near the oil refineries in Iraq, Environmental Research, 227, 115791, 2023.
28. Otokunfor, T.V., Obiukwu, C., Impact of Refinery Effluent on The Physicochemical Properties of a Water Body in The Niger Delta, Applied Ecology and Environmental Research, 3 (1), 61-72, 2005.
29. Zeitoun, M., kayal, N., Vij, S., Türk, D., Cullman, J., Why negotiate water problems when we can deliberate water solutions?, Nature Water, 1, 306-307, 2023.
30. Stahl, H. & Merz, C., Study to support the Commission in gathering structured information and defining of reporting obligations on waste oils and other hazardous waste, Publications Office of the European Union. Luxembourg, 2020.
31. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği. Eurostat Teknoloji Sınıflamaları Listesi. <https://tobb.org.tr/SanayiMudurlugu/Documents/YerliMali/Eurostat%20verilerine%20gore%20teknoloji%20siniflamalari.docx>. Erişim tarihi Nisan 19, 2024.
32. Eurostat Methodologies and Working Papers. NACE Rev.2 Statistical classification of economic activities in the European Community. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5902521/KS-RA-07-015-EN.PDF>. Yayın tarihi 2008. Erişim tarihi Eylül 24, 2024.
33. Baird, R.B., Eaton, A.D., Rice, E.W., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington D.C., A.B.D., 2017.
34. Leonards, P., Comber, M., Forbes, S., Whale, G., Den Haan, K., Concawe effluent speciation Project Report, CONCAWE, Brussels, 2010.
35. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Numune Alma Ve Analiz Metodları Tebliği. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=13482&MevzuatTur=9&MevzuatTertip=5>. Yayın tarihi Ekim 10, 2010. Erişim tarihi Eylül 15, 2024.
36. Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Rice, E.W., Greenberg, A.E., Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association (APHA) Press, Washington, USA, 2005.
37. World Health Organization, Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth edition incorporating the first addendum, World Health Organization, Geneva, İsveç, 2017.
38. Orosun, M.M., Nwabachili, S., Alshehri, R.F., Omeje, M., Alshdoughi, I.F., Okoro, H.K., Ogunkunle, C.O., Louis, H., Abdulhamid, F.A., Osahon, S.E., Mohammed, A.U., Ehinlafa, E.O., Yunus, S.O., Ife-Adediran, O., Potentially toxic metals in irrigation water, soil, and vegetables and their health risks using Monte Carlo models, Scientific Reports, 13, 21220, 2023.
39. Zivkovic, N., Takic, L., Djordjevic, L., Djordjevic, A., Mladenovic-Ranisavljevic, I., Golubovic, T., Bozilov, A., Concentrations of Heavy Metal Cations and a Health Risk Assessment of Sediments and River Surface Water: A Case Study from a Serbian Mine, Polish Journal of Environmental Studies, 28 (3), 2009-2020, 2019.
40. Li, Z., Ma, Z., Kuijp, T.J.V.D., Yuan, Z., Huang, L., A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment, Science of The Total Environment, 468-469, 843-853, 2014.
41. University of Tennessee. The Risk Assessment Information System. <https://rais.ornl.gov/>. Erişim tarihi Aralık 4, 2024.
42. U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System. <https://www.epa.gov/iris>. Yayın tarihi Ocak 13, 2025. Erişim tarihi Ocak 30, 2025.
43. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Explanation of ATSDR's Public Health Assessment Process. <https://www.atsdr.cdc.gov/pha-guidance/resources/Full-PHA-Process-Explanation-508.pdf>. Erişim tarihi Aralık 4, 2023.
44. Ayaz, H., Nawaz, R., Nasim, I., Irshad, M.A., Irfan, A., Khurshid, I., Okla, M.K., Wondmine, G.F., Ahmed, Z., Comprehensive human health risk assessment of heavy metal contamination in urban soils: insights from selected metropolitan zones, Frontiers in Environmental Science, 11, 1260317, 2023.
45. Nyashanu, P.N., Shafodino, F.S., Mwapagha, L.M., Determining the potential human health risks posed by heavy metals present in municipal sewage sludge from a wastewater treatment plant, Scientific African, 20, e01735, 2023.
46. Pan, S., An, W., Li, H., Su, M., Zhang, J., Yang, M., Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years, Journal of Hazardous Materials, 280, 288-294, 2014.
47. Cao, S., Duan, X., Zhao, X., Ma, J., Dong, T., Huang, N., Sun, C., He, B., Wei, F., Health risks from the exposure of children to As, Se, Pb and other heavy metals near the largest coking plant in China, Science of the Total Environment, 472, 1001-1009, 2014.
48. U.S. Environmental Protection Agency, A Guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule, U.S. Environmental Protection Agency Office of Wastewater Management, Washington, A.B.D., 1995.
49. U.S. Environmental Protection Agency. Report of the Hazard Identification Assessment Review Committee. <https://archive.epa.gov/scipoly/sap/meetings/web/pdf/inorganicsarsenic.pdf>. Yayın tarihi Ağustos 21, 2001. Erişim tarihi Nisan 25, 2024.
50. Duan, B., Zhang, W., Zheng, H., Wu, C., Zhang, Q., Bu, Y., Comparison of Health Risk Assessments of Heavy Metals and As in Sewage Sludge from Wastewater Treatment Plants (WWTPs) for Adults and Children in the Urban District of Taiyuan, China, International Journal of Environmental Research and Public Health, 14 (10), 1194, 2017.
51. Praveena, S.M., Ismail, S.N.S., Aris, A.Z., Health risk assessment of heavy metal exposure in urban soil from Seri Kembangan (Malaysia), Arabian Journal of Geosciences, 8, 9753-9761, 2015.
52. Ofosu-Asiedu, L., Cobbina, S.J., Obiri, S., Non-cancer human health risk assessment from exposure to Cadmium, Copper, Lead and Mercury in surface water and ground water in Konongo-Odumasi Municipality, Ghana, Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 5 (4), 106-112, 2013.
53. EPA, 1992 U.S. Environmental Protection Agency. Guidelines for Exposure Assessment. https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-11/documents/guidelines_exp_assessment.pdf. Yayın tarihi Mayıs 29, 1992. Erişim tarihi Kasım 22, 2023.
54. World Health Organization, WHO Human Health Risk Assessment Toolkit Chemical Hazards, IPCS harmonization project document, Geneva, İsveç, 2021.
55. Health Canada. Guidance on Human Health Preliminary Quantitative Risk Assessment (PQRA). <https://publications.gc.ca/collections/Collection/H46-2-04-367E.pdf>. Yayın tarihi Eylül, 2004. Erişim tarihi Ağustos 19, 2024.
56. Agoro, M., Adeniji, A.O., Adefisoye, M.A., Okoh, O.O., Heavy Metals in Wastewater and Sewage Sludge from Selected Municipal Treatment Plants in Eastern Cape Province, South Africa, Water, 12, 2746, 2020.
57. Nag, R., Monahan, C., Whyte, P., Markey, B.K., O'Flaherty, V., Bolton, D., Fenton, O., Rivhards, K.G., Cummins, E., Risk assessment of Escherichia coli in bioaerosols generated following land application of farmyard slurry, Science of the Total Environment, 791, 148189, 2021.
58. Tytla, M. ve Rzonca, K.W., Ecological and human health risk assessment of heavy metals in sewage sludge produced in Silesian Voivodeship, Poland: a case study, Environmental Monitoring and Assessment, 195, 1373, 2023.
59. Alidadi, H., Sany, S.B.T., Oftadeh, B.Z.G., Mohamad, T., Shamszade, H., Fakhari, M., Health risk assessments of arsenic and toxic heavy metal exposure in drinking water in northeast Iran, Environmental Health and Preventive Medicine, 24, 59, 2019.
60. Djedjibegovic, J., Marjanovic, A., Tahirovic, D., Caklovica, K., Turalic, A., Lugusic, A., Omeragic, E., Sober, M., Caklovica, F., Heavy metals in commercial fish and seafood products and risk assessment in adult population in Bosnia and Herzegovina, Scientific Reports, 10, 13238, 2020.
61. Simionov, I.A., Calmuc, M., Iticescu, C., Calmuc, V., Georgescu, P.L., Faggio, C., Petrea, Ş.M., Human health risk assessment of potentially

- toxic elements and microplastics accumulation in products from the Danube River Basin fish market, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 104, 104307, 2023.
62. Man, Y.B., Sun, X.L., Zhao, Y.G., Lopez, B.N., Chung, S.S., Wu, S.C., Cheung, K.C., Wong, M.H., Health risk assessment of abandoned agricultural soils based on heavy metal contents in Hong Kong, the world's most populated city, *Environment International*, 36 (6), 570-576, 2010.
 63. Endale, Y.T., Ambelu, A., Sahilu, G., Mees, B., Laing, G.D., Exposure and health risk assessment from consumption of Pb contaminated water in Addis Ababa, Ethiopia, *Heliyon*, 7 (9), e07946, 2021.
 64. Gnonsoro, U.P., Assi, Y.E.D.A., Sangare, N.S., Kouakou, Y.U., Trokourey, A., Health Risk Assessment of Heavy Metals (Pb, Cd, Hg) in Hydroalcoholic Gels of Abidjan, Côte d'Ivoire, *Biological Trace Element Research*, 200, 2510–2518, 2022.
 65. Mohammadi, A.A., Zarei, A., Majidi, S., Ghaderpoury, A., Hashempour, Y., Sahgi, M.H., Alinejad, A., Yousefi, M., Hosseingholizadeh, N., Ghaderpoori, M., Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals in drinking water of Khorramabad, Iran, *MethodsX*, 6, 1642-1651, 2019.
 66. U.S. Environmental Protection Agency. U.S. EPA's Integrated Risk, Information System (IRIS). https://tools.niehs.nih.gov/srp/1/Resources/arzuaga_iris_20091019.pdf. Yayın tarihi Ekim 19, 2009. Erişim tarihi Ağustos 19, 2024.
 67. Mahfooz, Y., Yasar, A., Gujian, L., Ul Islam, Q., Akhtar, A.B.T., Rasheed, R., Irshad, S., Naem, U., Critical risk analysis of metals toxicity in wastewater irrigated soil and crops: a study of a semi-arid developing region, *Nature*, 10, 12845, 2020.
 68. Wu, D., Chen, L., Ma, Z., Zhou, D., Fu, L., Liu, M., Zhang, T., Yang, J., Zhen, Q., Source analysis and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in total suspended particulate matter (TSP) from Bengbu, China, 14, 5080, 2024.
 69. Moloi, M., Ogbeide, O., Otomo, P.V., Health risk assessment of the heavy metals at wastewater discharge points of textile industries in Tongi, Shitalakkhya, and Dhaleshwari, Bangladesh, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 224, 113421, 2020.
 70. Uddin, M., Alam, F.B., Health risk assessment of the heavy metals at wastewater discharge points of textile industries in Tongi, Shitalakkhya, and Dhaleshwari, Bangladesh, *Journal of Water and Health*, 21 (5), 586-600, 2023.
 71. Bakare, C.G., Adeyinka, G.C., Evaluating the Potential Health Risks of Selected Heavy Metals across Four Wastewater Treatment Water Works in Durban, South Africa, *Toxics*, 10, 340, 2022.
 72. Sun, Z., Chen, J., Risk Assessment of Potentially Toxic Elements (PTEs) Pollution at a Rural Industrial Wasteland in an Abandoned Metallurgy Factory in North China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 85, 2018.
 73. Aendo, P., Netvichian, R., Thiededsakul, P., Khaodhiar, S., Tulayakul, P., Carcinogenic Risk of Pb, Cd, Ni, and Cr and Critical Ecological Risk of Cd and Cu in Soil and Groundwater around the Municipal Solid Waste Open Dump in Central Thailand, *Journal of Environmental and Public Health*, 3062215, 2022.
 74. Bahloul, M., Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in dry atmospheric deposits from Sfax solar saltern area in southeast of Tunisia, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17, 1085-1105, 2020.
 75. U.S. Environmental Protection Agency. Cyanide, free ASRN 57-12-5. https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicallanding.cfm?substance_nmb=31. Yayın tarihi Eylül 28, 2010. Erişim tarihi Kasım 20, 2025.
 76. Environmental Protection Authority. Exposure and Risk Assessment (1080 and Cyanide): Human Health. <https://www.epa.govt.nz/assets/FileAPI/hso-no-ar/HRE05002/475377593c/HRE05002-044.pdf>. Erişim tarihi Mart 20, 2024.
 77. Srivastava, M., Srivastava, A., Yadav, A., Rawat, V., Source and Control of Hydrocarbon Pollution, *Hydrocarbon Pollution and its Effect on the Environment*, Editör: Ince M. ve Ince, O.K., IntechOpen, 1-21, 2019.
 78. Merlo, R., Gerhardt, M.B., Burlingham, F., Casas, C.D.L., Gill, E., Flippin, H., Petroleum Refinery Stripped Sour Water Treatment Using the Activated Sludge Process, *Water*, 83 (11), 2067-2078, 2011.
 79. Lawan, M.S., Kumar, R., Rashid, J., Barakat, M.A.E.F., Recent Advancements in the Treatment of Petroleum Refinery Wastewater, *Water*, 15, 3676, 2023.
 80. Ilyas, M., Ahmad, W., Khan, H., Yousaf, S., Yasir, M., Khan, A., Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: a review, *Reviews Environmental Health*, 34 (2), 171-186, 2019.
 81. Eldos, H.I., Khan, M., Zouari, N., Saeed, S., Al-Ghouti, M.A., Characterization and assessment of process water from oil and gas production: A case study of process wastewater in Qatar, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100210, 2022.
 82. Pinasseau, A., Zerger, B., Roth, J., Canova, M., Roudier, S., Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment, JRC Science for Policy Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018.
 83. Diya'uddeen, B.H., Daud, W.M.A.W., Aziz, A.R.A., Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review, *Process Safety and Environmental Protection*, 89 (2), 95-105, 2011.
 84. Ye, H., Liu, B., Wang, Q., How, Z.T., Zhan, Y., Chelme-Ayala, P., Guo, S., El-Din, M.G., Chen, C., Comprehensive chemical analysis and characterization of heavy oil electric desalting wastewaters in petroleum refineries, *Science of The Total Environment*, 724 (138117), 1-11, 2020.
 85. Ali, H., Khan, E., Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health, *Environmental Chemistry Letters*, 16, 903–917, 2018.
 86. Yang, L., Ge, S., Liu, J., Iqbal, Y., Jiang, Y., Sun, R., Ruan, X., Wang, Y., Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal(oid)s Contamination in Topsoil around a Lead and Zinc Smelter in Henan Province, Central China, *Toxics*, 11, 427, 2023.
 87. European Union. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>. Yayın tarihi Ağustos 4, 2024. Erişim tarihi Ekim 23, 2024.
 88. European Union. Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/107/oj>. Yayın tarihi Eylül 18, 2015. Erişim tarihi Ekim 24, 2024.
 89. Bao, Z., Wu, W., Liu, H., Yin, S., Chen, H., Geostatistical analyses of spatial distribution and origin of soil nutrients in long-term wastewater-irrigated area in Beijing, China, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 64 (3), 235-243, 2014.
 90. Pinasseau, A., Zerger, B., Roth, J., Canova, M., Roudier, S., Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment, EUR 29362 EN Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018.
 91. Shomar, B., Rovira, J., Human health risk assessment associated with the reuse of treated wastewater in arid areas, *Environmental Pollution*, 345, 123478, 2024.
 92. Singh, B., Mishra, R.K., Kumar, P., Arif, Z., Assessment of organic pollutants in petroleum refinery wastewater by LCMS analyzer, *Water-Energy Nexus*, 6, 167-176, 2023.
 93. Tetteh, E.K., Rathilal, S., Investigating dissolved air flotation factors for oil refinery wastewater treatment, CBU International Conference on Innovations in Science and Education, Prag-Çekya, 1-5, 21-23 Mart, 2018.
 94. Santos, C.E., Fonseca, A., Kumar, E., Bhatnagar, A., Vilar, V.J.P., Botelho, C.M.S., Boaventura, R.A.R., Performance evaluation of the main units of a refinery wastewater treatment plant – A case study, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3 (3), 2095-2103, 2015.
 95. Jiménez-Oyola, S., Escobar-Segovia, K., García-Martínez, M.-J., Ortega, M., Bolonio, D., García-Garizabal, I., Salgado, B., Human Health Risk Assessment for Exposure to Potentially Toxic Elements in Polluted Rivers in the Ecuadorian Amazon, *Water*, 13, 613, 2021.
 96. Al-Heety, E.A.M.S., Yassin, K.H., Abd-Alsalam, S., Health risk assessment of some heavy metals in urban community garden soils of Baghdad City, Iraq, *Human and Ecological Risk Assessment*, 23 (2), 225-240, 2017.
 97. Xiao, M., Xu, S., Yang, B., Zeng, G., Qian, L., Huang, H., Ren, S., Contamination, Source Apportionment, and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils Surrounding a Typical Copper Tailings Pond, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 14264, 2022.

98. Chakraborty, T. K., Ghosh, G. C., Ghosh, P., Jahan, I., Zaman, S., Islam, M. S., Hossain, M. R., Habib, A., Biswas, B., Sultana, N., Khan A. T., Arsenic, iron, and manganese in groundwater and its associated human health risk assessment in the rural area of Jashore, Bangladesh, *Journal of Water and Health* 20 (6), 888–902, 2022.
99. Shetty, B.R., Pai, B.J., Salmataj, S.A., Naik, N., Assessment of Carcinogenic and non-carcinogenic risk indices of heavy metal exposure in different age groups using Monte Carlo Simulation Approach, *Scientific Reports*, 14, 30319, 2024.
100. Haque, M.A., Jewel, M.A., Ferdoushi, Z., Begum, M., Husain, M.I., Mondal, S., Carcinogenic and Non-carcinogenic Human Health Risk from Exposure to Heavy Metals in Surface Water of Padma River, *Research Journal of Environmental Toxicology*, 12 (1), 18–23, 2018.