



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Atık yağ rafinasyon tesisleri için saha çalışmasına dayalı atık üretim faktörlerinin geliştirilmesi, proses ve proses dışı atık yönetiminin değerlendirilmesi

Development of waste generation factors based on field survey for waste oil refineries and appraisal of process and non-process waste management

Yazar(lar) (Author(s)): Volkan PELİTLİ¹, Hansu Jülide KÖROĞLU²

ORCID¹: 0000-0001-7332-4151

ORCID²: 0000-0002-7352-8717

To cite to this article: Pelitli V. ve Köroğlu H. J., “Atık yağ rafinasyon tesisleri için saha çalışmasına dayalı atık üretim faktörlerinin geliştirilmesi, proses ve proses dışı atık yönetiminin değerlendirilmesi”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Pelitli V. ve Köroğlu H. J., “Atık yağ rafinasyon tesisleri için saha çalışmasına dayalı atık üretim faktörlerinin geliştirilmesi, proses ve proses dışı atık yönetiminin değerlendirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1316298

Atık yağ rafinasyon tesisleri için saha çalışmasına dayalı atık üretim faktörlerinin geliştirilmesi, proses ve proses dışı atık yönetiminin değerlendirilmesi

Development of waste generation factors based on field survey for waste oil refineries and appraisal of process and non-process waste

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Atık üretim faktörleri geliştirilmiştir. / Waste generation factors have been identified.
- ❖ Atık yönetimi için stratejiler belirlenmiştir. / Waste management strategies have been established.
- ❖ Ort. atık üretim faktörü: 0,05 kg-atık/kg-kapasite / Avg. waste production factor: 0.05 kg-waste/kg-capacity

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Atık yağ rafinasyon tesisleri için saha bazlı ve vaka analizlerine dayalı atık üretim faktörleri geliştirilmiştir. / Waste generation factors, developed based on field-based and case studies, have been formulated for waste oil refineries.



Şekil. Atık yağ rafinasyonu ve atık oluşumu /Figure. Waste oil refining and waste generation

Amaç (Aim)

Çalışmanın amacı; atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanabilecek proses ve proses dışı atık çeşitleri ve miktarlarının belirlenerek, atık kodu bazında atık üretim faktörlerinin geliştirilmesidir. / The purpose of the study is to develop waste production factors based on waste codes by determining the types and quantities of process and non-process waste that may arise from waste oil refineries.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

2020-2022 yılları arasında 10 adet atık yağ rafinasyon tesisinde saha çalışmaları yürütülerek, atık üretim faktörleri tesis kapasitesi bazında maksimum ve minimum miktar aralığı olarak hesaplanmıştır. / The case studies were conducted in 10 waste oil refineries during between 2020 and 2022, which waste generation factors were calculated based on facility capacity, providing a range of maximum and minimum amounts.

Özgünlük (Originality)

Mevcut çalışma ile ilk kez atık yağ rafinasyon tesislerinde saha bazlı atık çalışması yürütülerek, atıklara ilişkin veriler ortaya konmuş ve atık üretim faktörleri hesaplanmıştır. / For the first time, with the current study, a field-based waste study was conducted in waste oil refineries, revealing data on waste and enabling the calculation of waste generation factors.

Bulgular (Findings)

Çalışma bulguları; atık yağ rafinasyon tesisleri için atık üretim faktörünün 0,01 – 0,12 (\bar{x} : 0,05) kg kg⁻¹ olduğunu göstermiştir. / The findings of the study showed that the calculated waste production factor for waste oil refineries was 0.01–0.12 (\bar{x} : 0.05) kg kg⁻¹.

Sonuç (Conclusion)

Tesis bazında üretilebilecek atık türü ve miktarlarının bilinmesi en iyi geri kazanım-dönüşüm, yeniden kullanım ve nihai bertaraf seçeneklerinin belirlenmesine yardımcı olacaktır. / Knowing the types and amounts of waste that can be produced on a refinery basis will help determine the best recovery-recycling, reuse and final disposal options.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Atık Yağ Rafinasyon Tesisleri için Saha Çalışmasına Dayalı Atık Üretim Faktörlerinin Geliştirilmesi, Proses ve Proses Dışı Atık Yönetiminin Değerlendirilmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Volkan PELİTLİ*, **Hansu Jülide KÖROĞLU**²

¹İklim ve Yaşam Bilimleri Başkan Yardımcılığı, TÜBİTAK MAM, Türkiye

²Malzeme ve Proses Teknolojileri Başkan Yardımcılığı, TÜBİTAK MAM, Türkiye

(Geliş/Received : 18.06.2023 ; Kabul/Accepted : 03.10.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 23.11.2024)

ÖZ

Atıkların etkin ve verimli yönetiminde 4R (azalt, yeniden kullan, geri dönüştür ve geri kazan) uygulamaları da dahil olmak üzere iyileştirmeler yapılabilmesi amacıyla atık üretimine ilişkin doğru ve gerçekçi verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak atık istatistiklerinde sektörel bazlı atık miktarlarının tahmin edilebilmesi için hala günümüzde detay veriler bulunmaması nedeniyle uygun olmayan atık üretim faktörleri farklı sektörler için kullanılmakta ve bu durumda gerçekçi olmayan sonuçlar elde edilmektedir. Bu sebeple bölgesel veya ülke genelinde sektörel bazlı atık oluşumları için geçerli olabilecek, saha bazlı atık üretim faktörlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Çevresel ve ekonomik açıdan büyük öneme sahip atık yağ rafinasyon sektörü için de oluşan atık miktarlarının doğru tahmin edilmesi; toplama, işleme ve bertaraf sistemlerinin planlanabilmesi için oldukça önemlidir. Bu çalışmanın amacı da ülkemizde sayıları hızla artan atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanabilecek, insan ve çevreye ciddi zarar verme potansiyeline sahip (H3B-alevlenir, H13-hassaslaştırıcı ve H14-ekotoksik) proses ve proses dışı atıklar için atık üretim faktörlerinin geliştirilmesi ve atıkların "Atık Yönetimi Yönetmeliği" kapsamında değerlendirilmesidir. Bu kapsamda atık üretiminin değerlendirilmesi amacıyla 10 adet atık yağ rafinasyon tesisi saha araştırması ve tesise özel mühendislik analizleriyle incelenmiştir (mevzuat inceleme, lisanslama ve atık nitelik belirleme). Saha çalışmalarına dayalı gerçekleştirilen hesaplamalar, en yüksek atık üretim faktörlerinin kilogram atık yağ başına sırasıyla; 0,0072-0,0402, 0,0069-0,0404 ve 0,0310 kg ile asit katranlarında (19 11 02*), fiziksel ve kimyasal işlemlerden kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar (19 02 05*) ve saha içi atıksu arıtımından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlarda (19 11 05*) olduğunu göstermiştir. Bu atıklar yeniden proses edilerek yeni ürünlerin üretiminde kullanılabilir geri dönüştürülebilir tipte atıklardır. Stratejik açıdan oldukça önemli olan bu bilgi, atık yağların rafine edilmesinden elde edilen kazanımları artırmak için büyük bir fırsat sunmaktadır. Ancak döngüsel ekonominin tam olarak uygulanması için hala uzun bir yol bulunmaktadır. Sonuç olarak geliştirilen atık üretim faktörleri atık yönetimine temel teşkil edecek olup, sektörden kaynaklanabilecek yıllık atık miktarlarının izlenmesi ve tahmin edilmesine yardımcı olarak, yetkililer için karar destek mekanizması oluşturulmasına önemli katkılar sağlayacaktır. Bununla birlikte, atık yağ rafinasyon tesislerinde oluşan atık türleri ve atık miktarlarının ilk kez bu çalışmada ortaya konulduğundan da altı çizilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Atık yağ, atık üretim faktörleri, rafinasyon, baz yağ, atık yönetimi.

Development of Waste Generation Factors Based on Field Survey for Waste Oil Refineries and Appraisal of Process and Non-Process Waste Management

ABSTRACT

The accurate and realistic data on waste generation is needed to make improvements in the effective and efficient management of waste including the application of 4R (reduce, reuse, recycle and recover). However, due to the lack of detailed data for estimating sectoral-based waste amounts in waste statistics, inappropriate waste generation factors are used for different sectors and unrealistic results can be obtained in this case. For this reason, it is necessary to develop the field-based waste generation factors that can be valid for regional or country-wide sector-based waste generation. Accurate estimation of the amount of waste generated as a result of refining is crucial for the waste oil sector, which has significant environmental and economic value. The aim of our study was to develop the waste generation factors for process and non-process wastes that may originate from rapidly growing waste oil refineries because of its potential to cause serious harm (H3B-flammable, H13-leachate with hazardous properties, H14-ecotoxic) to humans and the environment and evaluation within the scope of "Waste Management Regulation". To evaluate waste generation within the scope of the study, the ten-waste oil-refining plants were investigated through field survey and site-specific engineering analysis (regulatory review, licensing and qualification). Using the field survey approach, the performed calculations showed that the highest waste generation factors were found in acid tars (19 11 02*), sludge's from physico/chemical treatment containing dangerous substances (19 02 05*) and sludges from on-site effluent treatment containing dangerous substances (19 11 05*) with generation rates between 0,0072-0,0402, 0,0069-0,0404 and 0,0310 kg of waste per kg of waste oil, respectively. These are recyclable wastes type that can be re-processed and made new products. The availability of this strategically important information will offer a surplus opportunity for increasing profits from the refining of waste oils. However, there is still a long way to attain

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : volkan.pelitli@tubitak.gov.tr

full circular economy. As a result, the developed waste generation factors will form the basis for waste management and will contribute to the establishment of a decision support mechanism for the authorities by helping to monitor and predict the annual waste amounts that may arise from the sector. Moreover, it's important to note that this current study has, for the first time, revealed the types and quantities of waste present in waste oil refineries.

Keywords: Waste oil, waste generation factors, refining, base oil, waste management.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv ve endüstriyel yağlar (motor, dişli, hidrolik, türbin, kompresör, ısı transfer, trafo vb.) genel olarak sürtünmelerin azaltılması, aşınmaların önlenmesi ve proses veriminin artırılması amacıyla makine ve ekipmanlarda kullanılan ve metal yüzeyler arasında taşıyıcı mikrofilm tabakası oluşturan, karbon sayıları C_{20} ile C_{40+} , kaynama noktaları 300 ile 600 °C ve moleküler ağırlıkları da 300 ile 600 Da (≈ 200 amu) arasında değişen parafinik, izoparafinik, aromatik ve/veya naftenik sıvı ürünlerdir [1-3]. Dünya çapında her yıl yaklaşık olarak 30-40 milyon ton yağlayıcı ürün üretilmekte olup, pazar büyüklüğü de yaklaşık 120-130 milyar \$'dır [4, 5]. Bu miktar, Avrupa Birliğinde (AB) yıllık 7,2 (6,172 – 8,074) milyon ton ile 36 milyar \$ civarındayken, ülkemizde ise yaklaşık 500 bin ton ile 300 milyon \$ mertebesindedir [6-9]. Global boyutta 20 milyar \$'lık pazar payı ile ABD yağlayıcı ürün grubunda lider konumdadır [10]. Bu ülkeyi ise sırasıyla Çin, Hindistan, Rusya, Japonya, Brezilya, Endonezya, Almanya, Güney Kore, Meksika, Kanada, Nijerya, Tayland, İngiltere, İran, Fransa, Türkiye, Avustralya ve İtalya gibi ülkeler izlemektedir [11]. Gelecek 10 yıllık tahminler incelendiğinde hızlı nüfus artışı, sanayileşme, karayolu altyapılarının iyileştirilmesi ve otomobil teknolojilerindeki en son gelişmelerle birlikte, otomobillere olan talebin giderek artması ve çeşitli endüstrilerde yağlayıcılara daha fazla ihtiyaç duyulması sebebi ile küresel pazarın büyümeye devam ederek 2030 yılında 180 Milyar \$'a ulaşması beklenmektedir [12]. Bu sebeple 2020 yılında 4,8 kg olan kişi başı yağ tüketiminin, önümüzdeki yıllarda 4,9 kg'a yükselmesi ve dolayısıyla da dünya genelinde yağlayıcı hammaddelere yönelik talebin daha da artması beklenmektedir [13]. Gerçekleşecek talep artışı, atıkların alternatif kaynak olarak daha verimli kullanılmasını zorunlu kılacaktır. Dolayısıyla önümüzdeki 10 yıl içerisinde döngüsel ekonomi yaklaşımının, tedarik zincirinin yerel ekonomik çözümler geliştirilmesi amacıyla çevre dostu yeni kullanım seçeneklerini daha fazla teşvik etmesi beklenmektedir.

Yağlar genel olarak en büyük maliyet kalemi olan ≥ 85 oranında baz yağlar (ham petrol rafinasyonu ile elde edilen hidrokarbonlar ya da sentetik baz yağlar) ile miktarları ppm mertebesinde yüzde (%) mertebesine kadar değişen anti-oksidantlar, korozyon inhibitörleri, deterjanlar, dispersantlar, pas önleyiciler, viskozite indeksi geliştiriciler ve basınç dayanım artırıcılar gibi sentetik kimyasal katkı maddelerinin karışımından oluşmakta olup, %90'nı ham petrol kaynaklarından üretilmektedir [4, 14]. Bu sebeple üretim sürecinde fosil kaynakların (ham petrol ve/veya doğal gaz) kullanımı sonucunda, 4,8 – 5,8 kg CO_2e/kg gibi oldukça yüksek

karbon ayak izi (ham petrol çıkarma, nakliye, rafinasyon, satış, kullanım ve bertaraf) oluşmaktadır [15]. Çevresel etkilerin potansiyel azaltımı içinse üreticilerle birlikte karar vericilerin de geri kazanım seçeneklerini daha fazla benimsemesi gerekmektedir.

Yağlar genel olarak kullanımları sırasında (i) yüksek basınç, (ii) temas halindeki yüzeyler arasındaki hız farkları, (iii) sürtünme yüzeylerindeki değişimler ve (iv) yağ özelliklerine bağlı olarak hidrokarbon yapısının bozulması ve çeşitli kirleticileri (su, yakıt, toz, aşınma metalleri) bünyelerinde biriktirmeleri nedeniyle zaman içerisinde faydalı kullanım özelliklerini kaybetmektedir [16]. Faydalı kullanım ömürleri sonunda (mesafe ya da süre bazlı) yağlayıcı ürünler, bakım talimatlarına uygun olarak yenileriyle değiştirilmekte ve bünyelerinde bulunan ağır metaller (Fe, Cu, Cd, Zn, Mn, Cr, Ba, As, Pb), solventler, hafif fraksiyonlar ve organik kirleticilerin (poliklorlu bifeniller-PCB, poliaromatik hidrokarbonlar-PAH vb.) sebep olduğu toksisite ve sitotoksisite nedeniyle tehlikeli özelliğe sahip atık yağların oluşumuna sebep olmaktadır [17-21]. Dünya genelinde her yıl yaklaşık olarak 24 milyon ve AB'de 4-6 milyon ton atık yağ olduğu tahmin edilmektedir [22, 23]. Ülkemizde ise yıllık bazda 32.520-70.130 ton atık yağ toplanmaktadır [24, 25]. Bu miktarlar göz önüne alındığında atık yağlar, dünya üzerindeki *en büyük sıvı tehlikeli atık* konumundadır. Bu sebeple hem ulusal hem de uluslararası mevzuat, insan sağlığı ve çevrenin korunması için, atık yağların doğru ve verimli şekilde yönetilmesini (üretim, depolama, geri kazanım/dönüşüm ve bertaraf) ve yüksek geri kazanım potansiyelinden yararlanılmasını gerektirmektedir [26]. Bu amaç doğrultusunda; önleme, tekrar kullanım ve geri kazanım yöntemleri için kullanılabilir atık yağ hiyerarşisi Şekil 1'de verilmiştir.

Günümüzde kaynakların doğru yönetimi ve verimli kullanımı, sürdürülebilir bir ekonomiye geçişte daha fazla merkezi rol oynamaktadır. Atık yağların etkili yönetimi de geri kazanım anlayışı benimsendiğinde, sürdürülebilirlik, daha iyi ekonomik, sosyal ve çevresel faydalar sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Enerji geri kazanımı düşünüldüğünde de atık yağlar 40-43 MJ/kg gibi yüksek enerji içerikleri nedeniyle değerli bir kaynak olarak kabul edilmektedir.



Şekil 1. Atık yağlar için atık yönetim hiyerarşisi (Waste management hierarchy for waste oils) [26]

Ancak, çevresel bakış açısı zorunlu olmadıkça atık yağların yakılması önermemektedir. Örneğin 5 lt atık yağın uygun olmayan yani illegal şekilde yakılması sonucunda, bir insanın 3 yıldan fazla ihtiyaç duyduğu eşdeğer hava kirletilebilmektedir. Ayrıca uygun olmayan yanma sonucunda ortaya çıkan krom ve bileşikleri de bazı kanser türlerine sebep olabilmektedir [27]. Atık yağ rafinasyon seçeneği ise (hammadde geri kazanım) daha fazla kullanım için değerli baz yağların (2 €/kg baz yağ, 0,2 €/kg dip bakiye) yeniden üretimi ile sonuçlanmakta ve kayıt dışı kullanımı azaltmakta hatta önlemektedir [27-30]. Bu nedenle atık yağ geri kazanım tesislerinin, rafinasyon teknolojilerini baz alacak şekilde faaliyetlerini sürdürmesi oldukça önemlidir.

Gerçekleştirilen çalışmalar ham petrolden üretime kıyasla, atık yağ yeniden rafinasyon işleminin fosil kaynak tüketiminde 34 kat, CO₂ emisyonlarında 2-3 kat (0,68 kg CO_{2e}/kg), asidifikasyon potansiyelinde 6 kat ve partikül oluşumunda da 5 kat daha avantajlı olduğunu göstermiştir [31, 32]. Buna paralel olarak, AB çevre mevzuatı da atık hiyerarşisine uygun olarak atık yağların yeniden rafine edilmesini önermektedir. Bu kapsamda, Avrupa’da (Finlandiya, Fransa, Almanya, Hollanda, İtalya, İspanya, Danimarka, Yunanistan, Polonya, Portekiz, Romanya, İngiltere, Bulgaristan ve Belarus) toplam kapasitesi yaklaşık 1,2 milyon ton olan 16 adet atık yağ rafinasyon firması faaliyet göstermektedir [33, 34].

Atık yağların rafinasyonunda çok çeşitli fiziksel ve kimyasal prosesler (susuzlaştırma, vakum sıyırma, vakum distilasyon, ekstraksiyon, termal asfalt giderme, hidrojenleme vb.) kullanılmakta olup, işlenen atık yağ karakteri, kullanılan kimyasallar, teknik proses adımları ve verimlerine bağlı olarak çok çeşitli atıklar üretilebilmektedir. Bu nedenle çevresel risklerin önlenmesi amacıyla etkili bir atık yönetimi sistemi, rafinasyon tesislerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Mevzuat açısından tüm tesisler üretim faaliyetlerini sahip oldukları atık yönetim izin ve çevre lisanslarına uygun olarak yürütmelidir. Aksi halde, rafinasyon tesislerinin kendisinin önemli bir kirlilik kaynağı olması ihtimali son derece istenmeyen hem çevresel hem de sosyal açıdan kabul edilemez bir durumdur. Bu sebeple rafinasyon proseslerinin çevre üzerindeki etkileri en aza indirecek şekilde yürütülmesi gerekmektedir. Buna rağmen, rafinasyon tesislerinden kaynaklanan atıklar, türleri ve miktarları hakkında günümüze kadar herhangi bir

araştırma yapılmamıştır. Çalışma kapsamında yayınlanmış bilimsel makalelerin aranmasına dayanan literatür taraması da (Web of Science, Thomson Reuters, Scopus, Scencedirect, 2023) atık rafinasyon tesislerinden kaynaklanan atıkların yönetimine ilişkin herhangi çalışma bulunmadığını göstermiştir. Özellikle atık oluşumuna ilişkin bilgi eksikliği bulunduğu da vurgulanmalıdır. Literatürdeki veriler oldukça kısıtlı olup, doğru ve yeterli veri sağlayamamaktadır. Bundan dolayı tüm paydaşlar için atık türleri ve miktarlarının doğru belirlenmesi, atık yönetim eylemlerinin seçimini kolaylaştıracak değerli bilgiler sağlanması önemlidir. Bu amaçla mevcut çalışma, “Atık Yağ Rafinasyon” lisansına sahip tesislerinden kaynaklanabilecek atık tipleri ve miktarlarının belirlenmesi için detaylı saha çalışması sonuçlarını içermektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen saha çalışmaları ile tüm proses girdi ve çıktıları incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda Atık Yönetimi Yönetmeliğine (AYY) uygun olarak atık listeleri belirlenmiş ve atık üretim faktörleri geliştirilmiştir. Uygulanan yöntem sayesinde atık yağ rafinasyonundan kaynaklanabilecek atıklar hakkında gözlemsel ve nesnel veriler yerine, gelecekte oluşması beklenen miktarlar saptanarak sistematik ve nicel tahminler yapılması mümkün olacaktır. Bu sayede güvenilir atık envanteri oluşturulmasında, oluşabilecek atıklar ve buna karşılık gelen atık üretim faktörlerinin kullanılması ile tesis bazlı toplam atık miktarları belirlenerek atıkların kontrollü bir şekilde yönetilmesi sağlanacaktır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Ülkemizde atık yağlar 02.04.2015 tarihinde yayımlanan ve AB Atık Direktifi, Tehlikeli Atıklar Direktifi ve Atık Yağlar Direktifinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan Atık Çerçeve Direktifi (2008/98/AT) ile uyumlu olan AYY (RG 29314) kapsamında değerlendirilmektedir. Yönetmelikte belirtilen atık kodları Atık Çerçeve Direktifi ile uyumlu olup, ülkemizde de aynı atık kodları kullanılmaktadır. Yönetmelik Madde 9 gereği atık üreticileri yıllık atık beyan formlarını (web-tabanlı program) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığına beyan etmekle yükümlüdür. Bu atıklar, atık üreticilerinin ekonomik faaliyet sınıflandırması (NACE) ile doğrudan ilişkili olup, NACE sınıflandırması ile atıklar yıllık olarak izlenmekte ve kayıt altına alınmaktadır.

Çalışma kapsamında tesislerin NACE kodu;

- **38.22.01-** Tehlikeli atıkların ıslahı ve bertaraf edilmesi (tehlikeli atıkların ıslahını yapan tesislerin işletilmesi, zararlı atıkların yok edilmesi için kullanılmış malların bertarafı vb. faaliyetler (radyoaktif atıklar hariç) ve
- **19.20.16-** Petrolden madeni yağların (yağlama ve makine yağları) imalatı (gres yağı dâhil) olarak belirlenmiştir.

2.1 Saha Çalışması (Field Studies)

Saha çalışması ülkemizde faaliyet gösteren 10 adet lisanslı atık yağ rafinasyon tesisinde gerçekleştirilmiştir. Tesislerin üretim süreçleri hammadde girişinden baz yağ eldesine kadar takip edilmiş ve atık oluşumları hakkında veriler toplanmıştır. Ortalama tesis kapasitesi: 13.000 (≈ 2.000-60.000) ton/yıl olup, yaklaşık 30 (20-100) personel görev yapmaktadır. Çalışma kapsamında; tesislerin 2020-2022 yılları arasında, atık miktarları incelenerek her bir atık için olası minimum ve maksimum miktar cinsinden atık üretim faktörleri hesaplanmıştır.

Çalışmanın gerçekleştirildiği tesislere ait özellikler Çizelge 1’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Tesis isimleri ve tesise özel proses detayları ise *gizlilik sebebi ile açıklanmamıştır*.

2.2 Atık Üretim Faktörlerinin Hesaplanması (Calculation of Waste Generation Factors)

Atık üretim faktörleri atık miktarlarını (05 01 03*, 08 03 17*, 13 01 13*, 15 01 01, 15 01 02, 15 01 10*, 15 02 02*, 15 02 03, 16 05 07*, 16 05 08*, 17 04 05, 19 02 05*, 19 02 08*, 19 02 09*, 19 11 01*, 19 11 02*, 19 11 05*, 20 01 21*, 20 01 26*, 20 01 33*, 20 01 35*) göstermesi amacıyla, atık kodlarına göre minimum ve maksimum miktar aralığı olarak hesaplanmıştır.

Bu amaçla atık üretim faktörleri, atık miktarlarının toplam atık yağ girdisine (hammadde) bölünmesi ile elde edilmiştir (Formül 1). Faktörler fiili (gerçek) kapasitelere göre hesaplanmış ve “kg atık/kg atık yağ” olarak ifade edilmiştir.

$$\text{Atık Üretim Faktörü} = \frac{\text{Atık (atık kodu bazında atık miktarı,kg)}}{\text{Fiili Kapasite (atık yağ miktarı,kg)}} \quad (1)$$

Her sanayi kuruluşunda oluşabilecek tıbbi atıklar (18 01) ile belediye atıkları (20 03 01) ise çalışmaya dâhil edilmemiştir.

Atık kodlarına ilişkin ayrıntılı bilgilere; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan Atık Yönetimi Yönetmeliğinden (RG 02.04.2015 – 29314) ulaşabilmektedir [35].

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 Atık Yönetimi İçin Atık Üretim Faktörü Yaklaşımı (Waste Generation Factor Approach for Waste Management)

1987 yılında Birleşmiş Milletler (BM) tarafından yayınlanan “Ortak geleceğimiz; Brundtland Raporu” ve 1992 yılında Rio de Janeiro’da düzenlenen BM Çevre ve Kalkınma Konferansında (Rio Konferansı) yayınlanan “Rio Deklarasyonu” sonucunda, sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması amacıyla atıkların izlenmesi ve oluşum miktarlarına ilişkin projeksiyon çalışmaları için atık üretim faktörü yaklaşımı daha önemli hale gelmiştir. Araştırmacılar ve analistler de daha büyük çabalar göstererek atıkların azaltılması ve olumsuz etkilerinin önlenmesi amacıyla yönelik kararlara arka plan bilgisi oluşturacak atık üretim faktörlerinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Ancak, geliştirilen atık üretim faktörleri günümüzde hala son derece sınırlı olup, kullanımları konusunda da çok az deneyim bulunmaktadır. Genel olarak geliştirilen atık üretim faktörleri faaliyetlere ilişkin çevresel atıkları tanımlamakta, mevcut ve gelecekteki çevresel performans ve sürdürülebilirliğin hızlı şekilde değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Böylece etkili bir atık yönetimi için, atık işleme tesislerinin tipleri, tasarımları, kapasiteleri, personel ve ekipman ihtiyaçlarının belirlenmesi mümkün olmaktadır.

Çalışma kapsamında atık üretim faktörü yaklaşımı çerçevesinde; Marmara (5 adet), İç Anadolu (4 adet) ve Güneydoğu Anadolu (1 adet) bölgesindeki lisanslı atık yağ rafinasyon tesisleri incelenmiştir. Atık üretiminin doğru şekilde değerlendirilmesi amacıyla, ilk aşamada farklı atık yağ rafinasyon tesislerinden elde edilen veriler atık yönetim sistemi üzerinde etkili olduğundan tehlikeli (9 adet atık türü), tehlikesiz (4 adet tık türü) ve muhtemel (8 adet atık türü) karaktere göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma sonucunda tesislerde açığa çıkan tehlikeli atık oranlarının (≈ %100), tehlikesiz atık oranlarından önemli ölçüde fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Tehlikeli Atık Beyan Sistemine beyan edilen atık miktarları incelendiğinde, COVID-19 salgını nedeni ile 2020 yılında tesislerde oluşan toplam atık miktarlarının ortalama %48 oranında azaldığı görülmüştür.

Çizelge 1. Saha çalışmasının gerçekleştirildiği atık yağ rafinasyon tesislerine ait özellikler (Characteristics of waste oil refineries where field studies were carried out)

Atık Yağ Rafinasyon Tesisi	Kapasite (ton/yıl)	Proses	Kabul Edilen Atık Yağ Türleri
Tesis 1	15.000	S+TFE+E	Halojen içeren/içermeyen madeni bazlı atık işleme yağları --- Atık sentetik işleme yağları --- Mineral esaslı klor içeren/içermeyen ve sentetik atık hidrolik yağları --- Kolayca biyobozunur atık hidrolik yağlar --- Mineral esaslı klor içeren/içermeyen ve sentetik atık motor, şanzıman ve yağlama yağları --- Kolayca biyobozunur atık motor, şanzıman ve yağlama yağları --- Atık sentetik yalıtım ve ısı iletim yağları --- Kolayca biyobozunur atık yalıtım ve ısı iletim yağları --- Diğer atık yalıtım ve ısı iletim yağları --- Madeni bazlı klor içeren/içermeyen atık yalıtım ve ısı iletim yağları
Tesis 2	3.000	S+E	
Tesis 3	7.500	S+E	
Tesis 4	2.000	S+TFE+E	
Tesis 5	20.000	S+TFE+E	
Tesis 6	2.000	S+TFE+E	
Tesis 7	17.000	S+E	
Tesis 8	60.000	S+TFE	
Tesis 9	2.000	S+TFE+E	
Tesis 10	3.000	S+E	

S: Su ve Hafif Hidrokarbon (solvent) Uzaklaştırma, **TFE:** İnce Film Buharlaştırma, **E:** Solvent Ekstraksiyon

Atık üretim faktörü yaklaşımı çerçevesinde, ülkemizdeki farklı sektörler için geliştirilen atık üretim faktörleri, atık miktarlarını tahmin etme yönteminin geçerliliğinin göstermesi amacıyla ayrıca incelenmiştir. Bu kapsamda; 2007-2018 yılları arasında ülkemizde “**Atık Pil ve Akümülatör Geri Kazanımı** (Kurşun, çinko ve kalay üretimi - Tasnif edilmiş materyallerin geri kazanımı, NACE 24.43 – 38.32), **Plastik Ürün İmalatı** (NACE 22.20), Akümülatör ve Pil İmalatı (NACE 27.20), **Metal Sanayi** (NACE 37), **Fabrikasyon Metal Ürünleri İmalatı, Makine ve Teçhizat** (NACE 38), **Termik Santraller** (Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı, NACE 35.1) ve **Alüminyum Üretimi** (NACE 24.42)” için atık türleri ve üretim faktörlerinin farklı araştırmacılar tarafından belirlendiği tespit edilmiştir [36-41]. Elde edilen sonuçlara göre atık üretim faktörleri; atık pil ve akümülatör geri kazanımı için 0,011-0,5 kg/kg, plastik ürünlerin imalatı için 0,000257-0,2364 kg/kg, akümülatör ve pil imalatı için 1,63-2,84 kg/adet, metal sanayi için 0,054 kg/kg, fabrikasyon metal ürünleri imalatı, makine ve teçhizat için 0,07 kg/kg, termik santraller için 38,9-404,18 kg/MWh ve alüminyum üretimi için de 0,3957-5,476 kg/kg olarak hesaplanmıştır. Farklı sektörler için hesaplanan atık üretim faktörleri özet olarak Çizelge 2’de verilmiştir. Bu çalışma kapsamında belirlenen proses ve proses dışı atıklar ile atık üretim faktörleri ise bu sektörlerden tamamıyla farklı olduğundan ayrı şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle atık yağ rafinasyon sektöründeki kaynakların verimli kullanımı, atık miktarlarının tanımlanması ve çevre yönetim sisteminin iyileştirilmesi için gösterge olabilecek ve “planla-kontrol et-hareket et” yaklaşımı ile uyumlu olacak atık üretim faktörü yaklaşımının geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu açıktır [42].

3.2 Atık Yağ Rafinasyon Tesisleri (Waste Oil Refining Plants)

Ülkemizde faaliyet gösteren atık yağ rafinasyon tesislerine ait prosesler genel olarak üç ana başlık altında toplanmaktadır. Bu prosesler sırasıyla; ön işlem amacıyla tortu/kaba malzeme ve su uzaklaştırma, ardından daha az değerli fraksiyonları gidermek için vakum altında hafif hidrokarbon distilasyonu, asfalt giderme ve bitirme adımları için hidrojenasyon ve/veya solvent ekstraksiyon

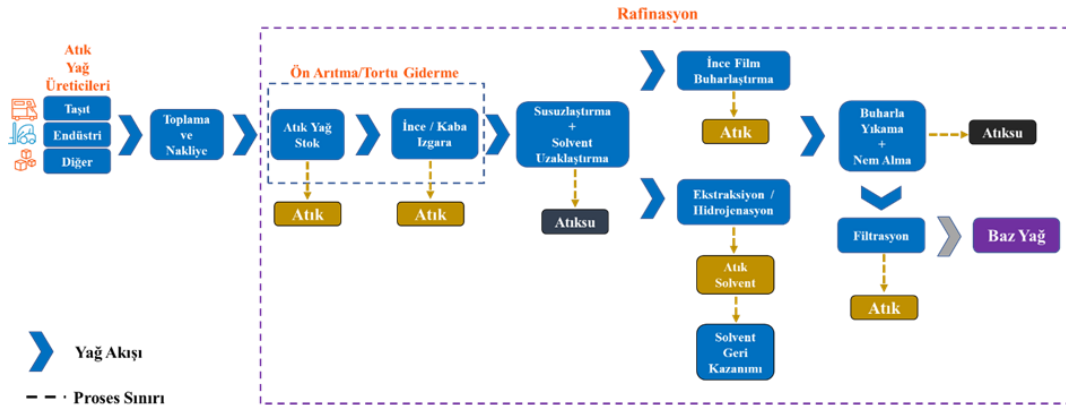
adımlarından oluşmaktadır. Ülkemizde faaliyet gösteren rafinasyon tesislerine ait genel proses akım şeması Şekil 2’de verilmiştir.

Rafinasyon prosesleri, rejenerasyon yöntemlerine göre yüksek derecede kirletici uzaklaştırma kapasitesine sahip olup, proses sonucunda yeni yağların üretimi için kullanılacak ulusal/uluslararası standartlara uygun fiziksel ve kimyasal özelliklerine (görünüş, viskozite indeksi, hidrokarbon içeriği, kükürt içeriği, parlama noktası, akma noktası, asit sayısı, baz sayısı, su içeriği, ağır metal içeriği, uçuculuk, PCB ve PAH miktarı) göre 2 tipe (solvent ekstraksiyonu ile Grup I ve hidrojenasyon ile Grup II) ayrılan baz yağ üretimi ile sonuçlanmaktadır. Üretilen baz yağlardan endüstriyel yağlar, hidrolik yağlar, kompresör yağları, ısı transfer yağları ve greslerin üretilmesi mümkündür. Rafinasyon teknolojisinin seçimi ise özellikle motor yağlarında kullanılan katkı paketlerinin giderimini sağlayacak;

- I. İşletme parametreleri (sıcaklık, ürün geri kazanımı, ürün kalitesi),
- II. Maliyetler (enerji tüketimi, ekipman ihtiyacı, birim ölçek) ve
- III. Çevresel etkilere (ağır metal, PCB ve PAH giderimi, yağlı tehlikeli atık ve atıksu oluşumu)

bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [43].

Ülkemizde olduğu gibi global ölçekte de solvent ekstraksiyon, ince film buharlaştırma ve hidrojenasyon yöntemleri atık yağ rafinasyonu için mevcut en iyi teknolojiler olarak tanımlanmaktadır. Ülkemizde toplam 70.000 ton/yıl solvent ekstraksiyon ve ince film buharlaştırma ile 60.000 ton/yıl mertebesinde hidrojenasyon kapasitesi bulunmaktadır Avrupa’da ise solvent ekstraksiyon prosesi yaygın olarak Almanya (230.000 ton/yıl), Danimarka (40.000 ton/yıl), İspanya (78.000 ton/yıl) ve İngiltere’de (50.000 ton/yıl); hidrojenasyon prosesi Finlandiya (60.000 ton/yıl), Yunanistan (40.000 ton/yıl), İtalya (214.000 ton/yıl), Polonya (80.000 ton/yıl) ve İspanya’da (59.000 ton/yıl) kullanılmaktadır. İnce film buharlaştırma prosesi ise genel olarak tek bir proses halinde ya da hidrojenasyon yöntemiyle birlikte kullanılmaktadır [44]. Ülkemizde kullanılan rafinasyon teknolojilerine ait özellikler, avantaj ve dezavantajları ile Çizelge 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Atık yağ rafinasyon prosesi akım şeması (Main scheme for the refining process of waste oils)

Çizelge 2. Farklı sektörler için geliştirilen atık üretim faktörleri (Waste generation factors developed for different sectors)

NACE/ TOBB Kodu	Tanım	Sektör	Atık Kodu	Tehlikelilik Özelliği	Atık Üretim Faktörü	Sıra
24.43 - 38.32	Kurşun, çinko ve kalay üretimi - Tasnif edilmiş materyallerin geri kazanımı	Atık Pil ve Akümülatör Geri Kazanımı	10 04 01*	Tehlikeli	0,005-0,1 ¹	[36]
			10 04 05*	Tehlikeli	0,005-0,25 ¹	
			19 02 05*	Muhtemel	0,001-0,15 ¹	
22.20	Plastik ürünlerin imalatı	İmalat	07 02 03*	Tehlikeli	0,0002-0,04 ¹	[37]
			07 02 08*	Tehlikeli	0,00003-0,1 ¹	
			08 01 11*	Muhtemel	0,0000009-0,02245 ¹	
			08 01 13*	Muhtemel	0,0000018-0,04 ¹	
			08 01 17*	Muhtemel	0,00001-0,00025 ¹	
			12 01 20*	Muhtemel	0,0000037-0,0115 ¹	
27.20	Akümülatör ve pil imalatı	İmalat	16 05 07*	Muhtemel	0,000011-0,0222 ¹	[38]
			10 04 01*	Tehlikeli	0,3-0,7 ²	
			10 04 02*	Tehlikeli	0,03-0,04 ²	
37	Metal Sanayi	İmalat	-	Tehlikeli	1,3-2,1 ²	[39]
38	Fabrikasyon metal ürünleri imalatı, makine ve teçhizat	İmalat	-	Tehlikeli	0,054 ¹	
35.1	Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı	Üretim	06 13 02*	Tehlikeli	0,00015-0,014 ³	[40]
			10 01 01	Tehlikeli	1,3-87 ³	
			10 01 02	Tehlikesiz	24-270 ³	
			10 01 05/07	Tehlikesiz	7,3-32 ³	
			10 01 09*	Tehlikeli	6,3-14 ³	
			13 07 01*	Tehlikeli	0,000015-0,84 ³	
			13 07 03*	Tehlikeli	0,114 ³	
			19 08 13*	Muhtemel	0,000023-0,21 ³	
19 09 05	Tehlikesiz	0,000031-0,0009 ³				
24.42	Alüminyum üretimi	İmalat	01 03 09	Tehlikesiz	0,3-2,5 ¹	[41]
			10 03 02	Tehlikesiz	0,01-0,45 ¹	
			10 03 04*	Tehlikeli	0,0002-0,02 ¹	
			10 03 08*	Tehlikeli	0,0002-0,5 ¹	
			10 03 09*	Tehlikeli	0,005-0,676 ¹	
			10 03 16	Tehlikesiz	0,08-0,12 ¹	
			10 03 20	Tehlikesiz	0,0001-0,08 ¹	
10 03 22	Tehlikesiz	0,0002-1,13 ¹				

¹ Kg atık/kg ürün & ² Kg atık/adet ürün & ³ Kg/MWh

Çizelge 3. Atık yağların rafinasyonunda kullanılan proseslere ait özellikler (The characteristics of processes used for refining of waste oils)

Proses	Tanım	Avantaj	Dezavantaj	Atık Oluşumu	Maliyet
Ön Arıtma/Tortu Giderme	Tortular basit fiziksel/mekanik arıtma ile uzaklaştırılmaktadır.	Yer çekimi etkisi kullanılmaktadır.	Son ürün eldesi söz konusu değildir.	Düşük	Düşük
Su ve Hafif Hidrokarbon (solvent) Uzaklaştırma	Atık yağlar ilk aşamada ham petrol rafinasyonuna benzer olarak bünyelerinde bulunan su, yakıt ve diğer uçucu organik bileşenlerin (hafif fraksiyon) uzaklaştırılması amacıyla damıtma işlemine maruz bırakılmaktadır. Bu aşama distilasyon reaktörlerinde <100-200 °C'ye kadar vakum altında gerçekleştirilmektedir.	Atık yağlarda bulunan su ve hafif hidrokarbonlar uzaklaştırılmaktadır. Aynı zamanda suların sebep olacağı korozyonlar da önlenmektedir.	Yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) olan, askıda katı madde (AKM) ve yağ-gres içeren atıksu oluşmaktadır.	Yüksek	Düşük
İnce Film Buharlaştırma (TFE)	Susuzlaştırılan ve içindeki hafif fraksiyonlardan arındırılan atık yağlar vakum altında < 320-360°C'ye kadar ince asfaltik malzemelerden ayrılmaktadır. Böylece asfaltik ve bitümlü malzemeler dip bakiye olarak uzaklaştırılmaktadır.	Daha düşük sıcaklık ve alıkonma süresi kullanılmaktadır. Oluşan dip bakiye asfalt katkısı olarak kullanılabilir.	Ağır fraksiyonları içeren dip bakiye oluşumu söz konusudur. Sistemin işletilmesi ve bakımı zordur.	Düşük	Yüksek
Solvent Ekstraksiyonu	Organik solvent olarak N-Metil-2-pirrolidon (NMP), propanol ve etanın kullanıldığı ekstraksiyon adımıyla viskozite indeksi geliştirilmiş, termal stabilite ve oksidasyon kararlılığına sahip TS 13369 standardına uygun rafine baz yağlar üretilebilmektedir. NMP son derece kuvvetli bir solvent olup, doymamış hidrokarbonlar, aromatikler ve kükürtlü bileşikler için seçici afinite göstermektedir. Kirleticiler asfalt, metalik bileşikler veya reçine olarak ortandan ayrılmaktadır [43].	Prosesin sahip olduğu baz yağ üretim verimi ve baz yağ kalitesi yüksektir. Grup I baz yağlar üretilmektedir.	Bu aşamanın en büyük dezavantajı yetmişmiş insan gücüne ihtiyaç duyulmasıdır. Ayrıca, sistemde problemler yaşanması durumunda solvent kaçağı mümkündür.	Yüksek	Yüksek
Hidrojenasyon	Kükürt, azot ve oksijen giderimini sağlayan katalizörler varlığında atık yağlar hidrojen ile muamele edilmektedir. Solvent ekstraksiyonu ile kullanıldığında baz yağ kalitesi daha da artmaktadır.	Yüksek kükürt, azot, metal ve doymamış hidrokarbon giderimi sağlanmaktadır. Baz yağlar yüksek saflık ve düşük aromatik içeriğe sahiptir. Grup II baz yağlar üretilebilmektedir.	Proses küçük ölçeklerde kullanıma uygun olmayıp, yüksek basınç (~80 bar) ve sıcaklığa ihtiyaç duymaktadır [44].	Düşük	Yüksek

Çalışma kapsamında tesislerde rafine edilen atık yağlar, kullanımları ve oluşumları sırasında toz, metal parçacıklar, su, termal parçalanma ve oksidasyondan kaynaklanan tehlikeli bileşenlerde dahil olmak üzere birçok kirleticiyi (benzenler, polisiklik aromatik hidrokarbonlar) bünyesinde bulundurabilmektedir [45].

Mevcut çalışma kapsamında incelenen tesislerde atık yağ hammadde stok tanklarından alınarak rafinasyon işlemine maruz bırakılan atık yağların özellikleri Çizelge 4'te sunulmuştur. Sonuçlar toplanan atık yağların metal içeriklerinin makine/motor tipi, kullanılan yağ karakteri ve kullanım süresine göre bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte Atık Yağların Yönetimi Yönetmeliği (AYYY) uyarınca yapılan analizler, PCB ve klor değerleri açısından toplanan atık yağların rafinasyon işlemine uygun olduğu göstermektedir.

Bu kirleticiler arasında yer alan poliklorlu bifeniller Stockholm Sözleşmesi Ek C'de "İstemsiz Üretim" olarak belirtilen kirleticiler arasında yer almaktadır [46]. Bu kirleticiler aynı zamanda, ABD Çevre Ajansı tarafından tehlikeli hava kirleticisi ve öncelikli kirleticiler listesine de eklenmiştir [47, 48].

Bu sebeple hangi rafinasyon teknolojisi kullanılırsa kullanılsın rafinasyon işlemi sonucunda tehlikeli kirleticiler (polar, asidik ve fenolik bileşikler, alkol, aldehytlar, poli-nükleer aromatikler, ağır metaller vb.) içerebilen birçok proses ve proses dışı atık oluşmaktadır [49]. Rafinasyon atıklarının güvenli şekilde bertaraf edilmesi ise halk sağlığı için kritik öneme sahip olup, rafinasyon tesislerinde kullanılan teknolojilerle birlikte çevre mevzuatı açısından da doğru atık yönetim sisteminin uygulanması gerekmektedir.

3.3 Atık Üretim Faktörlerinin Hesaplanması (Calculation of waste generation factors)

Çalışmanın gerçekleştirildiği tesislerde atık yağların

rafinasyon süreçlerindeki farklılıklara bağlı olarak atık türlerinin ve miktarlarının değiştiği gözlemlenmiştir. Oluşan atıklar; **Tehlikeli (A)**, **Tehlikesiz (-)** ve **Muhtemel (M)** atıklar olmak üzere 3 kategoriye ayrılmaktadır. Tehlikesiz atıklar genel olarak proses dışı ambalaj atıkları (kâğıt, karton, plastik vb.) ve hurda metallerden (demir-çelik) oluşurken, tehlikeli atıklar ise atık elektrik-elektronik eşyalarla (AEEE) birlikte yüksek hidrokarbon ve/veya ağır metal içeren farklı özelliklerdeki proses kaynaklı yanabilir yağlı atıklardan oluşmaktadır. Proses atıklarının miktarları iklimsel koşullar, reaktörlerin temizlenme sıklığı ve üretilen baz yağ kalitesine bağlı olarak tesisten tesise değişkenlik göstermektedir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri ise (alifatik ve aromatik hidrokarbonlar, asfaltlar, reçineler, su, katı madde içeriği, yoğunluk, viskozite, kalorifik değer vb.) atık yağ kaynağı, proses adımları ve rafinasyon aşamalarında kullanılan reaktiflere bağlıdır [50].

Çalışma sırasında proses ve proses dışı olmak üzere toplam 21 adet farklı atık türünün atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklandığı tespit edilmiş olup, atık türlerine göre dağılımları Şekil 3'te verilmiştir.

Atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanan tüm proses atıkları tehlikeli atık kategorisindedir. Atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanan proses atıklarının da H3-B alevlenir, H13 hassaslaştırıcı ve H14 ekotoksik özellikleri göstermeleri sebebi ile tehlikeli atık olduğu tespit edilmiştir [35].

Çalışma kapsamında kütleli bazda belirlenen atık üretim faktörleri atık listeleri ile detaylı olarak Çizelge 5'te verilmiştir. Mevcut sonuçlar proses akışı, atık tipleri, geri kazanım işlemleri (AYY EK-2/B) ve atık üretim faktörleri hakkında detaylı bilgiler içermesi açısından oldukça değerlidir. Değer aralığı olarak ifade edilen atık üretim faktörleri kullanılarak ileriye yönelik projeksiyon çalışmaları gerçekleştirilmesi mümkündür.

Çizelge 4. Atık yağlarda bulunan bileşenler (Various components in waste oils)

Parametre	Birim	Konsantrasyon (X̄)	SS (±)	Yöntem	AYYY Sınır Değer	Değerlendirme
Su	%	4,5	2,6	TS 6147 EN ISO 12937:2002	-	
Tortu	%	1,3	1,2	ASTM D 4055	-	
PCB	mg kg ⁻¹	2,2	3,4	EN 12766-2	< 20	
Klor	%	0,0374	0,0116	EPA 5050 & SM 4110 B	< 1	
Fe	mg kg ⁻¹	91,1	4,5		-	
Cr	mg kg ⁻¹	2,5	0,5		-	
Pb	mg kg ⁻¹	1,0	0,9		-	
Cu	mg kg ⁻¹	17,0	5,0		-	Rafinasyona Uygun
Al	mg kg ⁻¹	20,4	4,9		-	
Si	mg kg ⁻¹	40,1	16,1	ASTM D 6595-00	-	
Mg	mg kg ⁻¹	125,8	7,8		-	
Ca	mg kg ⁻¹	1.523	30,3		-	
Na	mg kg ⁻¹	1.350,6	2.195,3		-	
P	mg kg ⁻¹	529,6	246,5		-	
Zn	mg kg ⁻¹	251,0	82,4		-	
Mo	mg kg ⁻¹	22,5	2,8		-	
Mn	mg kg ⁻¹	3,0	0,9		-	
As	mg kg ⁻¹	< 1	0		-	

X̄: Ortalama SS: Standart Sapma



Şekil 3. Belirlenen atıkların kademeli dağılımı (Gradual distribution of identified wastes)

Üretilen atıkların büyük bir kısmını “asit katranları (19 11 02*), fiziksel ve kimyasal işlemlerden kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar (19 02 05*), saha içi atıksu arıtımından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar (19 11 05*), kullanılmış filtre killeri (19 11 01*), tehlikeli maddelerle kirlenmiş emiciler, filtre malzemeleri (başka şekilde tanımlanmamış ise yağ filtreleri), temizleme bezleri, koruyucu giysiler (15 02 02*), tehlikeli maddeler içeren katı yanabilir atıklar (19 02 09*), tank dibi çamurları (05 01 03*) ve tehlikeli maddelerin kalıntıları içeren ya da tehlikeli maddelerle kontamine olmuş ambalajlar (15 01 10*)” oluşturmaktadır. Dikkat edilmesi gereken diğer atık kodları ise sırasıyla; 19 02 08*, 17 04 05, 13 01 13*, 15 01 01, 15 02 03, 20 01 26*, 15 01 02, 16 05 07*16 05 08*, 20 01 33*, 08 03 17*, 20 01 35* ve 20 01 21*’dir.

Atık yağ rafinasyon tesisler için tüm atıklar dikkate alındığında, hesaplanan *toplam atık üretim faktörü* $0,01 - 0,12 (kg\ kg^{-1})$ ve *ortalama* $0,05 (kg\ kg^{-1})$ ’dir. Bu değerler “en iyi değer” olarak kullanılabilir. Çalışma kapsamında hesaplanan toplam atık üretim faktörü etkinliğinin daha büyük ölçekte incelenmesi için ülkemizde faaliyet gösteren farklı sektörlerle birim kütle (kg/kg) bazında karşılaştırması Çizelge 6’da verilmiştir. Genel olarak hesaplanan değer literatürde farklı sektörler için verilen değer aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca çalışma kapsamında belirlenen toplam atık üretim faktörünün; hidrojenasyon, solvent ekstraksiyon, TFE ve ağartma toprağı (kil) gibi proseslerin kullanıldığı rafinasyon tesisleri için “Mevcut En İyi Teknikler (MET) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP)” dokümanlarında belirtilen toplam atık üretim faktörleri ve diğer tesisler ile karşılaştırması da Çizelge 7’de verilmiştir. Bu çalışmada belirlenen toplam atık üretim faktörünün AB’deki farklı rafinasyon tesisleri ortalaması ile karşılaştırıldığında (benchmarking) uyumlu olduğu görülmektedir. Buna göre atık kodu bazında belirlenen atık üretim faktörleri çoğu değişkeni açıklamada başarılı

olup, kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. Adsorbsiyon teknolojisi kullanılarak trafo yağlarında bulunan nem, çamur ve asidik ürünlerin giderildiği tesislerde ise atık miktarı yaklaşık 2-3 kat daha fazladır. Literatür verilerinin değişkenliği ile çalışma sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, atık üretim faktörleri karşılaştırılmasının atık yağ kaynağı, atık yağ karakteri yani kirlilik seviyesi, istenilen son ürün kalitesi, kullanılan geri kazanım teknolojisi ve proses kimyasallarına ilişkin bilgilerle birlikte yorumlanması gerektiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte literatürde rafinasyon tesisleri için atık kodu bazında herhangi bir veri bulunmadığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Geliştirilen atık üretim faktörleri, rafinasyon tesislerine ait kapasite bilgilerinin bilinmesi durumunda, karar vericiler için tesislerinden kaynaklanabilecek toplam atık miktarlarının tahmin edilmesinde faydalı olacaktır. Bu sonuçlar aynı zamanda lisanslı geri kazanım ve geri dönüşüm firmaları tarafından da kullanılabilir.

3.4 Atık Yönetiminin Değerlendirilmesi (Appraisal of waste management)

Atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanan proses ve proses dışı tüm atıklar, atık yönetimi çerçevesinde değerlendirildiklerinde; azaltma, geri kazanım ve geri dönüştürme işlemleri büyük bir problem teşkil etmekle birlikte, sürdürülebilirlik için temel bir zorunluluktur. Bu atıklar ilk aşamada lisanslı tesislerine ulaştırılmadan önce güvenli şekilde bekletilmeleri amacıyla geçici depolama alanlarında reaksiyona girmeyecek, insan ve çevre sağlığına zarar vermeyecek kadar dayanıklı bölümlerde bekletilmektedir. Ardından geri kazanımları amacıyla mevcut rafinasyon tesisleri dışında lisanslı geri kazanım tesislerine gönderilerek:

- **R1** (atık yakma ve beraber yakma),
- **R9** (yağların yeniden rafine edilmesi ve diğer kullanımlar),
- **R12** (R1-R11) ve **R13** (ara depolama) işlemlerine maruz bırakılmaktadır.

Çizelge 5. Atık kodları, türleri, kaynakları ve proses/proses-dışı atıklar için atık üretim faktörleri (Waste codes, types, sources and waste generation factors of process/non-process wastes)

Atık Kodu	Tehlikelilik Özelliği	Atık Kodu Tanımı	Atık Türü	Kaynak	Atık Üretim Faktörleri min.- maks. (kg atık/kg atık yağ)
05 01	Petrol Rafinasyon atıkları				
05 01 03*	Tehlikeli	Tank dibi çamurları	Proses atığı	Arıtma çamurları ve atık yağ stok tankları	0,0045 – 0,0125
08 03	Baskı Mürekkeplerinin İmalat, Formülasyon, Tedarik ve Kullanımından (İFTK) Kaynaklanan Atıklar				
08 03 17*	Muhtemel	Tehlikeli maddeler içeren atık baskı tonerleri	Proses dışı atık	Ofisler	0,0000022
13 01	Atık Hidrolik Yağlar				
13 01 13*	Tehlikeli	Diğer hidrolik yağlar	Proses dışı atık	İşlenemeyen veya işlenmesi uygun olmayan atık hidrolik yağlar	0,0042
15 01	Ambalaj (Belediyenin Ayrı Toplanmış Ambalaj Atıkları Dahil)				
15 01 01	Tehlikesiz	Kağıt ve karton ambalaj	Proses dışı atık	Ofisler	0,00000073 – 0,00083
15 01 02	Tehlikesiz	Plastik ambalaj	Proses dışı atık	Ofisler	0,00000049 – 0,0002
15 01 10*	Tehlikeli	Tehlikeli maddelerin kalıntılarını içeren ya da tehlikeli maddelerle kontamine olmuş ambalajlar	Proses dışı atık	Atık yağ ambalajları	0,000096 – 0,0115
15 02	Emiciler, Filtre Malzemeleri, Temizleme Bezleri ve Koruyucu Giysiler				
15 02 02*	Muhtemel	Tehlikeli maddelerle kirlenmiş emiciler, filtre malzemeleri (başka şekilde tanımlanmamış ise yağ filtreleri), temizleme bezleri, koruyucu giysiler	Proses dışı atık	Personel İSG donanımları ve üstüpler	0,00043 – 0,0155
15 02 03	Tehlikesiz	15 02 02 dışındaki emiciler, filtre malzemeleri, temizleme bezleri, koruyucu giysiler	Proses dışı atık	Personel İSG donanımları ve üstüpler	0,00061
16 05	Basınçlı Tank İçindeki Gazlar ve İskartaya Çıkmış Kimyasallar				
16 05 07*	Muhtemel	Tehlikeli maddeler içeren ya da bunlardan oluşan ıskarta anorganik kimyasallar	Proses dışı atık	Laboratuvar kimyasalları	0,00011
16 05 08*	Muhtemel	Tehlikeli maddeler içeren ya da bunlardan oluşan ıskarta organik kimyasallar	Proses dışı atık	Laboratuvar kimyasalları	0,000093
17 04	Metaller (Alaşım Dahil)				
17 04 05	Tehlikesiz	Demir ve çelik	Proses dışı atık	Bakım-onarım	0,0047
19 02	Atıkların Fiziki/Kimyasal Arıtmadan Kaynaklanan Atıklar (Krom Giderme, Siyanür Giderme, Nötralizasyon Dahil)				
19 02 05*	Muhtemel	Fiziksel ve kimyasal işlemlerden kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar	Proses atığı	Susuzlaştırma reaktörleri dip bakiyeler ve filtre pres ağartma toprağı kekleri	0,0069 – 0,0404
19 02 08*	Muhtemel	Tehlikeli maddeler içeren sıvı yanabilir atıklar	Proses atığı	Susuzlaştırmadan kaynaklanan hafif fraksiyonlar	0,00085 – 0,0088
19 02 09*	Muhtemel	Tehlikeli maddeler içeren katı yanabilir atıklar	Proses atığı	Dip bakiyeler	0,0137
19 11	Yağın Yeniden Üretiminden Kaynaklanan Atıklar				
19 11 01*	Tehlikeli	Kullanılmış filtre killeri	Proses atığı	Filtre pres kekleri	0,0099 – 0,0242
19 11 02*	Tehlikeli	Asit katranları	Proses atığı	Asidik çökeltiler	0,0072 – 0,0402
19 11 05*	Muhtemel	Saha içi atıksu arıtımından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar	Proses dışı atık	Atıksu arıtma tesisi	0,0310
20 01	Ayrı Toplanan Fraksiyonlar (15 01 Hariç)				
20 01 21*	Tehlikeli	Flüoresan lambalar ve diğer cıva içeren atıklar	Proses dışı atık	Ofisler ve işletme sahası	0,0000011
20 01 26*	Tehlikeli	20 01 25 dışındaki sıvı ve katı yağlar	Proses dışı atık	Yemekhaneden kaynaklanan bitkisel atık yağlar	0,0000096 – 0,00020
20 01 33*	Tehlikeli	16 06 01, 16 06 02 veya 16 06 03'ün altında geçen pil ve akümülatörler ve bu pilleri içeren sınıflandırılmamış karışık pil ve akümülatörler	Proses dışı atık	Ofisler ve atık yağ taşıma araçlarına ait aküler	0,0000027
20 01 35*	Tehlikeli	20 01 21 ve 20 01 23 dışındaki tehlikeli parçalar içeren ve ıskartaya çıkmış elektrikli ve elektronik ekipmanlar	Proses dışı atık	Eskimiş elektrik panoları ve ofis ekipmanları	0,0000022

Çizelge 6. Atık üretim faktörünün farklı sektörler için bildirilen literatürdeki değerlerle karşılaştırılması (Comparison of waste generation factor with literature reported values for different sectors)

NACE/ TOBB Kodu	Ülke	Sektör	Atık Üretim Faktörü (kg/kg)	Sıra
38.22.01 – 19.20.16	Türkiye	<i>Tehlikeli atıkların ıslahı ve bertaraf edilmesi (tehlikeli atıkların ıslahını yapan tesislerin işletilmesi, zararlı atıkların yok edilmesi için kullanılmış malların bertarafı vb. faaliyetler (radyoaktif atıklar hariç) - Petrolden madeni yağların (yağlama ve makine yağları) imalatı (gres yağı dâhil)''</i>	0,01 – 0,12	<i>Mevcut çalışma</i>
24.43 - 38.32	Türkiye	Kurşun, çinko ve kalay üretimi - Tasnif edilmiş materyallerin geri kazanımı	0,011 – 0,5	[36]
22.20	Türkiye	Plastik ürünlerin imalatı	0,0002574 – 0,2364	[37]
37 - 38	Türkiye	Metal Sanayi - Fabrikasyon metal ürünleri imalatı, makine ve teçhizat	0,007 – 0,054	[39]
24.42	Türkiye	Alüminyum üretimi	0,3957 – 5,476	[41]

Çizelge 7. Atık yağ rafinasyonu atık üretim faktörünün literatürdeki değerler karşılaştırılması (Comparison of waste generation factor of waste oil refining with literature reported values)

Ülke	Σ Atık Üretim Faktörü (kg/kg)	Sıra
<i>Türkiye</i>	<i>0,01 – 0,12 (ort. 0,05)</i>	<i>Mevcut çalışma</i>
AB	0,12 – 0,16	[51]
AB	0,04 – 0,05	[52]
Avustralya	0,21	[53]
Kanada	0,375 (Trafo yağları için)	[54]

R1 işlemine örnek olarak yağlarla kontamine olmuş filtre killerin ön işlem uygulandıktan sonra ek yakıt olarak çimento fabrikalarında kullanımı, R9 işlemine örnek olarak yenilenebilir sıvı ve katı yağlar dışındaki yağların biodizel üretimi amacıyla kullanımı, R12 işlemine örnek olarak distilasyon ünitelerinden kaynaklanan asfalt veya dip bakiyelerin (ağır fraksiyon) bitümlü astar üretimi (TS 103'e uygun) ya da farklı endüstrilerde hammadde olarak kullanımı ve R13 işlemine örnek olarak da kullanılmış filtre kekleri ve asit katranlarının tesis içi geçici depolanması verilebilmektedir. Ekstraksiyon aşamasında kullanılan organik solventlerin (atık solvent) geri kazanılarak tekrar ekstraksiyon adımıyla kullanımı ise tesis içi geri kazanıma tek örnektir. Rafinasyon işlemi sonucunda oluşan atıklara ilişkin AYY ile uyumlu geri kazanım işlemleri Çizelge 8'de verilmiştir.

Atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanan en önemli atık; proses bazlı 19 11 02* kodlu asidik çamurlar olup,

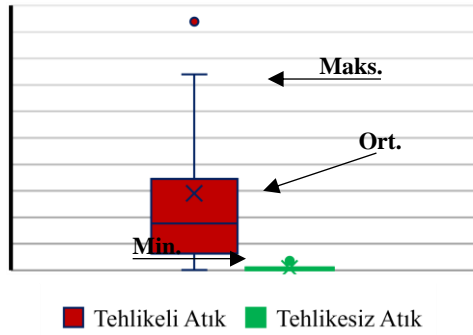
ön işlemde geçirilen atık yağların konsantre sülfürik asitle (H_2SO_4) muamele edildikten sonra asfalt ve greslerin giderimi amacıyla 24 saat reaktörlerde bekletilmesi sonucunda oluşmaktadır. Bu atıklar oldukça düşük pH (1,5-3,0) değerlerine sahip olup, en az %50 oranında hidrokarbon (alkanlar, aromatikler, asfaltenler) ve ağır metal içeriklerinden dolayı kanserojen ve immünotoksik potansiyele sahiptirler [55]. Ayrıca ekipmanlarda korozyona sebep olarak, tesis ömrünü de azaltmaktadırlar. Günümüzde rafinasyon tesisleri hem ekonomik-çevresel kaygılar hem de ulusal mevzuat gereği artık bu rejenerasyon yönteminden vazgeçtiklerinden, ileriki dönemlerde bu tip atıkların oluşması beklenmemektedir. Diğer bir önemli atık türü ise 19 02 05* kodlu çamurlardır. Bu atıklar rafinasyon işlemi güçlendirmek amacıyla atık yağların distilasyon ünitelerinde ön damıtma veya vakum damıtmaya maruz bırakılmaları sonucunda oluşan uçucu olmayan ağır fraksiyonlardan oluşmaktadır. Ayrıca kompozisyonları

Çizelge 8. Atık Yönetimi Yönetmeliğine göre atıkların geri kazanımı (Recycling of waste materials based on Regulation of Waste Management)

Atık Kodu	Geri Kazanım İşlemleri	Atık Kodu	Geri Kazanım İşlemleri
05 01 03*	R12	19 02 05*	R12
08 03 17*	R13	19 02 08*	R12
13 01 13*	R9	19 02 09*	R12
15 01 01	R12	19 11 01*	R1, R12, R13
15 01 02	R12	19 11 02*	R13
15 01 10*	R12	19 11 05*	R13
15 02 02*	R12, R13	20 01 21*	R13
15 02 03	R12	20 01 26*	R9
16 05 07*	R13	20 01 33*	R12
16 05 08*	R13	20 01 35*	R13
17 04 05	R12		

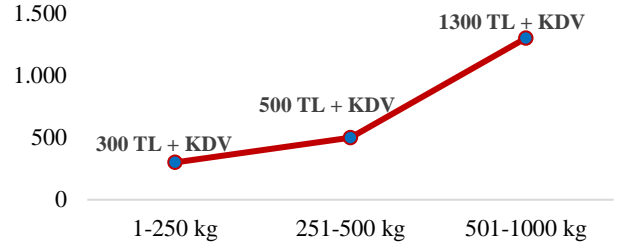
ve fiziksel özellikleri de tesisten tesise büyük farklılıklar göstermektedir. Bu atıklar ağır metal ve hidrokarbon içerikleri nedeniyle biyolojik parçalanma ve mineralizasyona karşı oldukça dayanıklı olup, çevrede kalıcı özellik göstermektedir [56]. Bu atıklar bitüm, asfalt üretimi ya da çimento fabrikalarında hammadde olarak kullanılabilir [49]. 19 11 01* kodlu atıklar ise asit-kil prosesinin devamı olarak, asidik işlemlerden çıkan atık yağlardan safsızlıkların (metallerin) adsorblanması ve renk giderimi için eklenen fazla miktarda kilin filtrasyonu sonucunda oluşmaktadır. Proses sonucunda bünyelerinde ağır metal ve %25-50 oranında yağ bulunduran killer genel olarak baz yağın fiziksel özelliklerini geliştirmektedir [57]. Bu atıkların eter ve etanol gibi solventler kullanılarak ekstraksiyon yöntemiyle geri kazanımı ise mümkündür [58].

Genel olarak atık yağ rafinasyon sektöründe faaliyet gösteren tüm tesisler dikkate alındığında, 2020-2022 yılları arasında maksimum 2.900 ton atık oluştuğu hesaplanmıştır. Yıllık bazda tesis başına oluşan ortalama tehlikeli atık miktarı 96,5 ton ve tehlikesiz atık miktarı da 90 kg'dır. Tesislerde oluşan atıklara ait Box-Whisker grafiği ve 2020-2022 yıllarına ait toplam atık miktarları (kg) Şekil 4'te verilmiştir. Box-Whisker grafiği atık yağ rafinasyon tesislerinde oluşan atıkların ortalama değer, ilk (%25) çeyrek, üçüncü (%75) çeyrek, minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir. Bu değerler yukarıda belirtilen farklı faktörlerin atık miktarlarını etkilediğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4. Atık miktarları Box-Whisker grafiği ve 2020-2022 yılları arasında üretilen toplam atık miktarları (Box-Whisker plot for waste amount and total waste amount generated between 2019-2021)

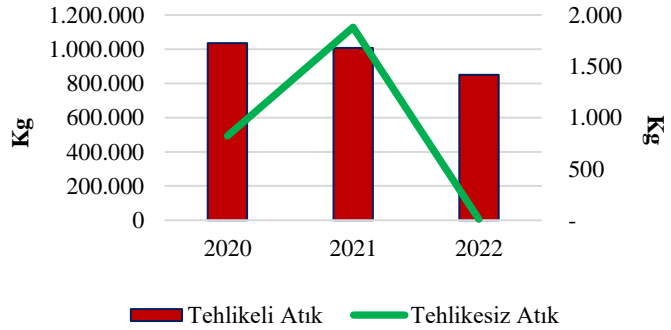
Atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanan proses atıklarının, çevre ve insan temasından yalıtılarak yönetilmesi gerektiğinden işlenmeleri ve bertarafı oldukça maliyetlidir. Atık yağ rafinasyon tesisleri için oluşan birim (kg) tehlikeli atık yönetim maliyetleri Şekil 5'de verilmiştir. Güncel atık yönetim maliyetleri dikkate alındığında atık tonajı, taşıma maliyetleri ve bölgesel farklılıklara bağlı olarak 2020-2022 yılları arasında tesis başına yıllık maliyetlerin 24 – 735 Bin TL+KDV arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte mevzuat değişiklikleri ve döngüsel ekonomi uygulamalarının yaygınlaştırılması durumunda, atık yönetimi uygulamaları ve maliyetlerinin büyük oranda etkileyeceği tahmin edilmektedir.



Şekil 5. Tehlikeli atık yönetim maliyetlerindeki değişim (Variation in hazardous waste management cost)

4.ÇALIŞMANIN SINIRLILIKLARI (LIMITATIONS of the STUDY)

Gerçekleştirilen çalışma, atık rafinasyon tesislerinde üretilmesi beklenen proses ve proses dışı atıkların tür ve miktarları hakkındaki sorulara yanıt vererek atık yönetim planlarının geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Atık yönetiminin planlanmasında atık üretim faktörlerinin kullanımını ilk adım olup, atık türlerinin anlaşılması, atık türleri ve miktarları hakkında hızlı ve kolay tahmin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu yöntem atık odak noktasının belirlenmesi ve oluştuğu coğrafi konumları araştırmak için oldukça faydalıdır. Ayrıca, çalışma sırasında 2022 yılı itibariyle faaliyet gösteren tüm rafinasyon tesisleri incelendiğinden sonuçların genellenebilirliği de söz konusudur. Bununla birlikte tesislerin kullandığı rafinasyon teknolojisi, proses



Şekil 4. Atık miktarları Box-Whisker grafiği ve 2020-2022 yılları arasında üretilen toplam atık miktarları (Box-Whisker plot for waste amount and total waste amount generated between 2019-2021)

verimi, tesisin coğrafi konumu, toplanan atık yağ karakteri, tesis tarafından uygulanan çevre plan ve politikalarına bağlı olarak atık üretim faktörleri geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu durum atık üretim faktörlerinin makul derecede istikrarlı olduğunu göstermektedir. Genel olarak mevcut sonuçlar en iyi yaklaşım uygulaması olup, tesis bazında atık verilerinin elde edilmesi zaman alıcı ve çoğu zaman gizlilik nedeniyle imkansız olduğundan atık üretimine ilişkin bir yaklaşım sağlamıştır. Aynı zamanda konuyla ilgili daha önceden yapılan herhangi bir araştırma bulunmadığı da unutulmamalıdır. Atık üretim faktörlerinin kalitesinin artırılması ise ancak farklı çalışmalardan gelecek daha fazla verinin kullanılmasıyla mümkün olacaktır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Ülkemizde 2022 yılı itibariyle solvent ekstraksiyon, ince film buharlaştırma ve hidrojenasyon yöntemlerinin kullanıldığı 10 adet lisanslı atık yağ rafinasyon tesisi faaliyet göstermektedir. Bu tesisler tehlikeli atık olarak tanımlanan atık yağların baz yağlara dönüştürülmesini sağlarken, aynı zamanda birçok proses ve proses dışı atığın oluşmasına da sebep olmaktadır. Tesislerden kaynaklanabilecek en önemli atıklar sırasıyla; 0,0072-0,0402, 0,0069-0,0404, 0,031, 0,0099-0,024, 0,00043-0,0155, 0,0137, 0,0045-0,0125 ve 0,000096-0,0115 kg kg⁻¹ atık üretim faktörlerine sahip olan asit katranları, fiziksel ve kimyasal işlemlerden kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar, saha içi atıksu arıtımından kaynaklanan tehlikeli maddeler içeren çamurlar, kullanılmış filtre killeri, tehlikeli maddelerle kirlenmiş emiciler, filtre malzemeleri (başka şekilde tanımlanmamış ise yağ filtreleri), temizleme bezleri, koruyucu giysiler, tehlikeli maddeler içeren katı yanabilir atıklar, tank dibi çamurları ve tehlikeli maddelerin kalıntılarını içeren ya da tehlikeli maddelerle kontamine olmuş ambalajlardır. Önerilen tüm atık üretim faktörleri proses ve proses dışı atıkların basit ama etkili şekilde tahmin edilmesine yardımcı olmaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen bu veriler ilk kez atık yağ rafinasyon tesislerinden kaynaklanan atıklar ve miktarlarına ilişkin sonuçları ortaya çıkarmıştır. Bu sayede oluşması muhtemel atıklar ve miktarlarının izlenmesi mümkün olurken, aynı zamanda etkin yönetimleri de sağlanacaktır. Bununla birlikte mevcut çalışma özel sektör ile kamu kurumları arasındaki çalışmalara iyi bir örnek olup, gelecek dönemde farklı çalışmalara da olanak sağlayacaktır.

SİMGELER (NOTATIONS)

E = %95 kesinlik düzeyi
N = Toplam faaliyet gösteren atık yağ rafinasyon tesis sayısı
TS = Çalışma yapılacak atık yağ rafinasyon tesis sayısı

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

AB = Avrupa Birliği
AEEE = Atık Elektrikli ve Elektronik Eşyalar
AYY = Atık Yönetimi Yönetmeliği
AYYY = Atık Yağların Yönetimi Yönetmeliği
AKM = Askıda Katı Madde
BM = Birleşmiş Milletler
E = Solvent Ekstraksiyon
H = Hidrojenasyon
KOİ = Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MET = Mevcut En İyi Teknikler
NACE = Ekonomik Faaliyetlerin İstatistiksel Sınıflandırması

NMP = N-Metil-2-Pirrolidon
PAH = Poliaromatik Hidrokarbonlar
PCB = Poliklorlu Bifeniller
UNEP = Birleşmiş Milletler Çevre Programı
S = Su ve Hafif Hidrokarbon (solvent) Uzaklaştırma
TFE = İnce Film Buharlaştırma
TOBB = Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada, "Atık Yağ Rafinasyon Tesisleri Proses Yeterliliğinin Belirlenmesi Projesi" kapsamında üretilmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Volkan PELİTLİ: Saha çalışmalarını yürütmüş, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Hansu Jülide KÖROĞLU: Proses özellikleri ve yeterliliğini değerlendirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hutchings, I. and Shipway, P., "*Friction and Wear of Engineering Materials*", Elsevier Ltd., (2017).
- [2] Jameel, A.G.A. and Sarathy, S.M., "*Lube Products: Molecular Characterization of Base Oils*", Wiley, (2018).
- [3] <https://www.petroleumhpv.org/petroleum-substances-and-categories/lubricating-oils>
- [4] Xie, M., Tan, H. and Zhao, G., "A clean and sustainable strategy to produce bio-lubricant with high-bearing and good anti-oxidation ability from Lanzhou lily", *Journal of Cleaner Production*, 371 (133333), 1-15, (2022).
- [5] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lubricants-market#:~:text=The%20global%20lubricants%20market%20size,demand%20for%20bio%2Dbased%20lubricants>
- [6] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Oil_and_petroleum_products_-_a_statistical_overview&oldid=315177#Consumption_in_sectors.

- [7] <https://chemicalmarketforecast.com/report/european-lubricants-market-and-technology-forecast-2020-2029/#:~:text=The%20European%20Lubricants%20Market%20attained,the%20forecast%20period%202021%202029.>
- [8] <https://www.petder.org.tr/Uploads/Document/52b69ce1-56c0-4bb3-b647-543f4b872cee.pdf?v=637768025270499593.>
- [9] İstanbul Kimyevi Maddeler ve Mamulleri İhracatçıları Birliği, “*Madeni Yağlar ve Mineral Yakıtlar Sektör Raporu*”, İKMİB, (2021).
- [10] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/us-lubricants-market>
- [11] <https://www.statista.com/statistics/821076/lubricants-global-market-volume-by-country/>
- [12] <https://www.emergenresearch.com/industry-report/lubricants-market>
- [13] <https://www.statista.com/statistics/720677/lubricants-demand-per-capita-worldwide-by-region/>
- [14] Nowak, P., Kucharska, K. and Kamiński, M., “Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment”, *Int J Environ Res Public Health*, 16 (16): 3002, 1-13, (2019).
- [15] <https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/base-stocks/neste-prioritises-sustainability/>
- [16] Trzepieciński, T., “Tribological Performance of Environmentally Friendly Bio-Degradable Lubricants Based on a Combination of Boric Acid and Bio-Based Oils”, *Materials*, 13 (17), 3892, (2020).
- [17] Ssempebwa, J. C. and Carpenter, D. O., “The generation, use and disposal of waste crankcase oil in developing countries: a case for Kampala district, Uganda”, *Journal of Hazardous Materials*, 161 (2-3): 835-41, (2009).
- [18] US Environmental Protection Agency, “*Hazardous waste management system; burning of waste fuel and used oil in boilers and industrial furnaces Fed Regist*”, EPA, USA, (1985).
- [19] Kanokkantapong, V., Kiatkittipong, W., Panyapinyopol, B., Wongsuchoto, P. and Pavasant, P., “Used lubricating oil management options based on life cycle thinking”, *Resources, Conservation and Recycling*, 53(5), 294-299, (2009).
- [20] Akintunde, W.O., Olugbenga, O.A. and Olufemi, O.O., “Some Adverse Effects of Used Engine Oil (Common Waste Pollutant) On Reproduction of Male Sprague Dawley Rats”, *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 3(1): 46-51, (2015).
- [21] Abdullah, N. M. B. T, Aluwi, N. S. B. M., Park, H. and Kamal, N. B. A., “Effect of Toxicity Concentration of Waste Lubricating Oil (Hazardous Noxious Substances) on Aquatic Life”, *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.11), 117-120, (2018).
- [22] Mousazade, M. R., Sedighi, M. , Khoshgoftar Manesh, M. H. and Ghasemi, M., “Mathematical Modeling of Waste Engine Oil Gasification for Synthesis Gas Production; Operating Parameters and Simulation”, *International Journal of Thermodynamics* , 25 (1) , 65-77, (2022).
- [23] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Waste_statistics
- [24] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/tcdr_tr_2015.pdf
- [25] https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2018_yili_tehlikeli_atik_istatistik_bulteni-23.03.2020-20200323143024.pdf.
- [26] https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-oil_en
- [27] Sánchez-Alvarracín, C., Criollo-Bravo, J., Albuja-Arias, D., García-Ávila, F. and Pelaez-Samaniego, M.R., “Characterization of Used Lubricant Oil in a Latin-American Medium-Size City and Analysis of Options for Its Regeneration”, *Recycling*, 6, 10, (2021).
- [28] Ucar, S., Karagöz, S., Yanik, J., Sağlam, M., and Yüksel, M., “Copyrolysis of scrap tires with waste lubricant oil”, *Fuel Processing Technology*, 87, 53-58, (2005).
- [29] Duđak, L., Milisavljević, S., Jcanović, M., Kiss, F., Šević, D., Karanović, V., and Orošnjak, M.D., “Life Cycle Assessment of Different Waste Lubrication Oil Management Options in Serbia”, *Applied Sciences*, 11, 6652, (2021).
- [30] Botas, J. A., Moreno, J., Espada, J. J., Serrano, D.P. and Dufour, J., “Recycling of used lubricating oil: Evaluation of environmental and energy performance by LCA”, *Resources, Conservation & Recycling*, 125, 315-323, (2017).
- [31] https://www.geir-rerefining.org/wp-content/uploads/GEIRpositionpaperWFD_2016_FINAL.pdf
- [32] Grice, L. N., Nobel, C. E., Longshore, L., Huntley, R., and De Vierno, A., “Life Cycle Carbon Footprint of Re-Refined versus Base Oil That Is Not Re-Refined”, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2, 158-164, (2014).
- [33] <https://www.geir-rerefining.org/members>
- [34] <https://www.geir-rerefining.org/statistics/>
- [35] https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/Atik_Yonetimi_Yonetmeligi-2017.docx
- [36] Çelebi, S., Yetiş, Ü. and Ünlü, K., “Identification of management strategies and generation factors for spent lead acid battery recovery plant wastes in Turkey”, *Waste Management & Research*, 37 (3): 199-209, (2018).
- [37] Öncel, M. S., Bektaş, N., Bayar, S., Engin, G., Çalışkan, Y. and Salar, L., “Hazardous wastes and waste generation factors for plastic products manufacturing industries in Turkey”, *Sustainable Environment Research*, 27 (4): 188-194, (2017).
- [38] Bayar, S., Bektaş, N., Öncel, M. S., Engin, G. O., Çalışkan, Y. and Çelebi, E. E., “Hazardous Wastes and Waste Generation Factors Originating from Battery and Accumulator Manufacturing Sector in Turkey”, *The Open Waste Management Journal*, 11: 12-18, (2018).
- [39] Karahan, Ö., Taşlı, R., Dulekgurgen, E. and Görgün, E., “Estimation of hazardous waste factors”, *Desalination and Water Treatment*, 26: 79-86, (2011).
- [40] Demir, C., Yetiş, Ü. and Ünlü, K., “Identification of waste management strategies and waste generation factors for thermal power plant sector wastes in Turkey”, *Waste Management & Research*, 37 (3), 210-218, (2018).

- [41] Küçük, E., Danacı, D. and Yetiş, Ü., “Waste Generation in Primary and Secondary Aluminum Sector in Turkey”, *5th International Conference On Sustainable Solid Waste Management*, Greece, (2017).
- [42] Beier, G., Kiefer, J. and Knopf, J., “Potentials of big data for corporate environmental management: A case study from the German automotive industry”, *Journal of Industrial Ecology*, 26: 336-349, (2020).
- [43] Jafari, A.J. and Hassanpour, M., “Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the World”, *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 179-191, (2015).
- [44] Kupareva, A., Mäki-Arvela, P. and Murzin, D. Y., “Technology for rerefining used lube oils applied in Europe: A review”, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88, 1780-1793, (2013).
- [45] [45] Wu, X., Yue, B., Su, Y., Wang, Q., Huang, Q., Wang, Q. and Cai H., “Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in common used mineral oils and their transformation during oil regeneration”, *Journal of Environmental Sciences*, 56: 247-253, (2017).
- [46] [46] Fiedler, H., “*Guidance by source category: Annex C, Part III Source Categories Waste oil refineries*”, United Nations Environment Programme, (2005).
- [47] <https://www.epa.gov/dioxin/common-sources-exposure-dioxin>
- [48] Al-Mutairi, N., Bufarsan, A. and Al-Rukaibi, F., “Ecorisk evaluation and treatability potential of soils contaminated with petroleum hydrocarbon-based fuels”, *Chemosphere*, 74 (1):142-148, (2008).
- [49] Bridjanian, H. and Sattarin, M., “Modern Recovery Methods in Used Oil Re-Refining”, *Petroleum & Coal*, 48, 40-43, (2006).
- [50] Hu, G., Li, J. and Zeng, G. “Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review”, *Journal of Hazardous Materials*, 261, 470-490, (2013).
- [51] https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC113018_WT_Bref.pdf
- [52] https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8601/IETC_Waste_Oils_Compendium.pdf?sequence=3&%3BisAllowed
- [53] <https://www.sor.com.au/wp-content/uploads/2020/03/There-refiningprocess.pdf>
- [54] <https://www.hering-vpt.com/article/transformer-oil-filtration-system/>
- [55] Asgari, A., Nabizadeh, R., Mahvi, A.H., Nasser, S., Dehghani, M.H., Nazmara, S. and Yaghmaeian, K., “Biodegradation of total petroleum hydrocarbons from acidic sludge produced by re-refinery industries of waste oil using in-vessel composting”, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 27; 15:3, (2017).
- [56] Yang, S., Zhang, J., Liu, Y. and Feng, W., “Biodegradation of hydrocarbons by *Purpureocillium lilacinum* and *Penicillium chrysogenum* from heavy oil sludge and their potential for bioremediation of contaminated soils”, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 178 (2023), 105566, (2023).
- [57] Al Zubaidi, I., Al Tamimi, A. and Al Zubaidi, M., “Applications of de-oiling and reactivation of spent clay”, *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101182, (2021).
- [58] Wang, Y. Z., Xu, H. L., Gao, L., Yan, M. M., Duan, H. L., Song, C. M., “Regeneration of spent lubricant refining clays by solvent extraction”, *International Journal of Chemical Engineering*, 207095, (2015).