

ENDÜSTRİYEL YAĞ KULLANIMINDA KARBON AYAK İZİNİN AZALTILMASI: ETKİN YAĞ YÖNETİMİNİN ÇEVRESEL VE EKONOMİK ETKİLERİ

Dilşat ÇOLAK

ÖZET

Günümüz iş dünyasında, çevresel sürdürülebilirlik endüstriyel işletmeler için giderek daha stratejik bir öncelik haline gelmektedir. Karbon ayak izinin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması, çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve kaynakların daha etkin kullanılması açısından kritik hedefler olarak öne çıkmaktadır. Karbon ayak izi, bir organizasyonun, ürünün veya faaliyetin sera gazı emisyonlarının ölçüldüğü ve değerlendirildiği önemli bir sürdürülebilirlik göstergesidir. Bu bağlamda, etkin yağ yönetimi uygulamaları, karbon ayak izinin azaltılmasında kilit bir rol oynamaktadır [1].

Bu bildiriye, endüstriyel yağ kullanımı ve değişiminde karbon ayak izinin azaltılması için etkin yağ yönetimi yaklaşımları incelenecektir. Ayrıca, son kullanıcı firmalar özelinde etkin yağ yönetimi uygulamasını ve bu uygulamanın karbon ayak izi azaltma etkileri ile finansal sonuçları değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Karbon Ayak İzi, Çevresel Sürdürülebilirlik, Yağ Yönetimi, Ürün Yaşam Döngüsü, SKDM, IoT, Tahmini Bakım

ABSTRACT

In today's business world, environmental sustainability is becoming an increasingly strategic priority for industrial enterprises. Reducing the carbon footprint and improving energy efficiency stand out as critical goals for minimizing environmental impacts and using resources more effectively. The carbon footprint is an important sustainability indicator that measures and evaluates the greenhouse gas emissions of an organization, product, or activity. In this context, effective oil management practices play a key role in reducing the carbon footprint [1].

This paper will examine effective oil management approaches for reducing the carbon footprint in the use and replacement of industrial oils. Additionally, it will evaluate the implementation of effective oil management practices by end-users and assess the impact of these practices on reducing the carbon footprint as well as their financial outcomes.

Keywords: Carbon Footprint, Environmental Sustainability, Oil Management, Product Life Cycle, CBAM, IoT, Predictive Maintenance

1. GİRİŞ

Sanayi sektörü, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %37'sinden ve enerjiye bağlı CO₂ emisyonlarının

%30'undan sorumludur [2]. Bu emisyonların önemli bir kısmı, ekipman sürtünmesinin azaltılması, ısı transferi ve korozyon önleme gibi kritik işlevleri olan endüstriyel yağların yaşam döngüsünden kaynaklanmaktadır. Bir litre sentetik dişli yağının üretimi, yaklaşık 2.5 - 3.5 kg CO₂e'lik bir karbon ayak izi oluşturur; bu, aynı hacimdeki benzinin yanmasıyla açığa çıkan emisyonu yakındır [3]. Ayrıca, atık yağların yanlış bertarafı, toprak ve su kirliliğine yol açarak ekosisteme geri dönüşü zor hasarlar verir. Bu nedenle, yağ yönetimi artık sadece bir bakım maliyeti unsuru değil, aynı zamanda kurumsal sürdürülebilirlik performansının ve SKDM'ye uyumun anahtarıdır. Bu bildiri, yaşam döngüsü analizi (LCA) perspektifinden hareketle, kanıtlanmış yağ yönetimi teknolojileri ve stratejileri aracılığıyla karbon ayak izini ve operasyonel maliyetleri eşzamanlı olarak nasıl azaltılabileceğini detaylandırmayı amaçlamaktadır.

2. SINIRDA KARBON DÜZENLEME MEKANİZMASI (SKDM)

SKDM, Avrupa Birliği'nin karbon kaçacağı önlemek amacıyla ithal ürünlerin karbon içeriğine göre vergilendirilmesini öngören bir mekanizmadır. Türkiye gibi AB ile yoğun ticaret yapan ülkeler için bu düzenleme, özellikle enerji yoğun sektörlerde maliyet artışlarına neden olabilir. Endüstriyel yağların üretimi ve kullanımı bu bağlamda önemli bir karbon kaynağıdır [2].

2.1. SKDM'nin Amacı ve Kapsamı

SKDM'nin temel amacı, karbon kaçacağı önlemek ve küresel karbon fiyatlandırmasını teşvik etmektir. Karbon kaçacağı, katı çevre düzenlemeleri nedeniyle üretimin düşük karbon maliyetli ülkelere kaymasıdır. SKDM kapsamında, demir-çelik, alüminyum, gübre, elektrik ve çimento gibi karbon yoğun sektörlerden ithal edilen ürünlere karbon vergisi uygulanacaktır [6]. Bu vergilendirme, ithalatçıların ürünlerin üretim sürecindeki emisyonları beyan etmesini ve karbon sertifikası satın almasını gerektirecektir.

2.2. Türkiye'ye Etkileri

Türkiye, AB ile Gümrük Birliği kapsamında yoğun ticaret gerçekleştirmektedir. SKDM'nin yürürlüğe girmesiyle birlikte, Türkiye'den AB'ye ihraç edilen karbon yoğun ürünler için karbon vergisi ödenmesi gerekecektir. Bu durum, özellikle demir-çelik, alüminyum ve çimento sektörlerinde rekabet gücünü azaltabilir. Ayrıca, karbon hesaplama ve raporlama altyapısının eksikliği, firmalar için uyum sürecini zorlaştıracaktır [7].

TÜİK verilerine göre Türkiye'nin Avrupa Birliği (AB-27) ülkelerine yaptığı ihracat 2023 yılında 104,3 milyar ABD doları iken, 2024 yılında bu rakam %4,08 artışla 108,5 milyar ABD dolarına ulaşmıştır [10]. Bu artış, SKDM kapsamında karbon vergisi uygulamalarının etkisini azaltmak için Türkiye'nin ihracat stratejilerini çeşitlendirmesi gerektiğini göstermektedir.

Tablo 1. AB ile yapılan ihracat tutarları

Yıl	İhracat (Bin ABD \$)
2023	104,283,598
2024	108,536,677

2.3. Sanayiye Yönelik Riskler ve Fırsatlar

SKDM, Türk sanayisi için hem risk hem de fırsatlar barındırmaktadır. Riskler arasında maliyet artışı, ihracat kaybı ve uyum yükümlülükleri yer almaktadır. Ancak, düşük karbon teknolojilerine geçiş yapan firmalar için rekabet avantajı elde etme imkanı doğacaktır. Ayrıca, karbon ayak izi azaltımı ve enerji verimliliği yatırımları, uzun vadede maliyetleri düşürebilir [8]. Türkiye'nin yeşil dönüşüm sürecine entegre olması, SKDM'ye uyumda stratejik bir avantaj sağlayacaktır.

2.4. Uyum Stratejileri

Türkiye'nin SKDM'ye uyum sağlayabilmesi için karbon hesaplama altyapısının geliştirilmesi, emisyon izleme sistemlerinin kurulması ve sanayiye yönelik teşvik mekanizmalarının oluşturulması gerekmektedir. ISO 14064 ve ISO 14067 gibi uluslararası standartlara uygun karbon raporlama sistemleri yaygınlaştırılmalıdır. Ayrıca, yeşil mutabakat eylem planı kapsamında düşük karbonlu üretim teknolojilerine yatırım yapılmalı ve firmalar bilgilendirilmelidir [9].

3. ENDÜSTRİYEL YAĞLARIN YAŞAM DÖNGÜSÜ VE KARBON AYAK İZİ

Endüstriyel bir yağın karbon ayak izi, dört ana aşamada hesaplanır [3]:

- I. **Hammadde Temini ve Rafinasyon (%20-30):** Endüstriyel bir yağın karbon ayak izi, başta ham petrolün çıkarılması, taşınması ve rafine edilmesi olmak üzere enerji yoğun süreçlerden kaynaklanır. Baz yağın kategorisi, bu aşamadaki emisyon miktarını doğrudan belirler. Geleneksel mineral yağların (Grup I) aksine, sentetik (PAO, Esterler) ve hidroişlem görmüş (Grup II/III) baz yağların üretimi, hidrocracking ve hidroizomerizasyon gibi yüksek basınç, sıcaklık ve hidrojen tüketimi gerektiren karmaşık kimyasal işlemler içermektedir [3]. Bu ileri teknoloji prosesler, birim hacim başına çok daha yüksek CO₂ emisyonu ile sonuçlanır. Bu bağlamda, bir Grup III+ baz yağın üretiminin, bir Grup I baz yağa kıyasla litre başına %50'ye varan oranda daha fazla CO₂ emisyonuna neden olabildiği, yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) çalışmalarında rapor edilmektedir [3]. Ancak, söz konusu ileri yağların sahip olduğu üstün performans özellikleri, bu yüksek başlangıç emisyonunu telafi edebilir. Üstün viskozite indeksi, düşük uçuculuk ve yüksek oksidasyon stabilitesi gibi özellikler, kullanım aşamasında sağlanan yakıt tasarrufu, uzatılmış yağ ömrü ve daha az tüketim ile bu fazla emisyonu dengeleyebilir ve nihayetinde tüm yaşam döngüsü boyunca net bir karbon azaltımı sağlayabilir.
- II. **Üretim ve Formülasyon (%10-20):** Bu aşama, baz yağlara katkı maddelerinin (anti-oksidan, aşınma önleyici, aşırı basınç (EP) katkıları vb.) eklenmesi, homojen bir karışım elde edilmesi ve nihai ürünün ambalajlanması işlemlerini kapsar. Karmaşık katkı maddelerinin sentezi ve özellikle yüksek performanslı yağlarda kullanılan çok bileşenli katkı paketlerinin homojenize edilmesi için gereken karıştırma işlemleri, bu fazın enerji tüketimini ve dolayısıyla karbon ayak izini artıran temel unsurlardır.
- III. **Kullanım Aşaması (%50-70):** Bu, yaşam döngüsündeki en büyük karbon ayak izi kaynağıdır. İki temel bileşenden oluşur:
 - o **Enerji Tüketimi:** Yağın kalitesi, sistemdeki sürtünmeyi ve enerji verimliliğini doğrudan etkiler. Düşük kaliteli veya bozulmuş bir yağ, hidrolik bir pompanın veya dişli kutusunun enerji tüketimini %5-15 artırabilir [12]. Viskozite optimizasyonu ve sürtünme azaltıcı katkı maddeleri (Friction Modifiers) ile bu kayıplar minimize edilebilir.
 - o **Yağ Ömrü ve Değişim Sıklığı:** Yağın bozulması, daha sık değişim gerektirir. Her yağ değişimi, yeni yağın üretim emisyonunu ve atık yağın bertaraf emisyonunu beraberinde getirir. Bu nedenle yağ ömrünü uzatmak, karbon ayak izini doğrudan azaltır.

IV. Bertaraf Aşaması (%5-10): Bu aşama, kullanılmış yağların toplanması, taşınması ve işlenmesinden kaynaklanan emisyonları kapsar. Kullanılmış yağın yakıt olarak geri kazanımı (örneğin çimento fırınlarında), fosil kaynaklı karbon salınımına neden olduğundan karbon nötr bir yöntem değildir. Buna karşılık, yeniden rafinasyon işlemi, yeni baz yağ üretimine kıyasla yaklaşık %70-80 daha az enerji tükettiği için çevresel açıdan tercih edilen bertaraf yöntemidir [3, 11].

ISO 14040/14044 ve ISO 14067 standartları, bu dört aşamayı kapsayacak şekilde yağın kümülatif karbon ayak izinin hesaplanması için metodoloji sağlar [3].

4. HİDROLİK SİSTEMLERDE YAĞ YÖNETİMİ VE KARBON AZALTIM STRATEJİLERİ

Hidrolik sistemler, endüstriyel tesislerdeki toplam enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturur. Bir hidrolik sistemdeki enerji kayıplarının başlıca nedenleri arasında sızdırmazlık kayıpları, valf kayıpları, pompa ve motor verimsizlikleri ile hidrolik akışkanın viskozitesi ve kirlilik seviyesiyle doğrudan ilişkili kayıplar gelir [12, 15]. Yağ kaynaklı kayıplar şunlardır:

- I. Viskozite Uyumsuzluğu:** Yağın viskozitesi ortam sıcaklığına ve çalışma basıncına uygun değilse, pompa için iç sürtünme (churning) kayıpları artar veya sistem verimi düşer. Aynı ISO VG sınıfındaki (örneğin ISO VG 46) geleneksel bir yağ yerine, yüksek viskozite indeksli (HVI) bir yağ kullanmak, sıcaklık dalgalanmalarında viskoziteyi daha stabil tutarak enerji tasarrufu sağlar [12].
- II. Kontaminasyon:** Partikül kirliliği, valf arızalarına ve pompa aşınmasına yol açarak sistem verimliliğini düşürür ve enerji tüketimini artırır [15]. Su kirliliği ise yağın yağlama yeteneğini azaltır ve oksidasyon hızını katlanarak artırarak ömrünü kısaltır [14]. Bu nedenle, uygun filtre seçimi ve düzenli kontaminasyon kontrolü, enerji verimliliğini ve yağ ömrünü korumak için kritik öneme sahiptir [13, 15].

Hidrolik sistemlerde karbon ayak izini azaltmaya yönelik etkin ve teknik detaylandırılmış stratejiler şunlardır [12, 13, 14, 15]:

- I. Gelişmiş Filtrasyon Sistemleri:** Partikül kirliliğini kontrol altında tutmak, bileşen aşınmasını ve enerji kayıplarını azaltmanın temelidir. Örneğin, 10 µm filtreler yerine, $\beta_3 \geq 200$ verimliliğindeki 3 µm filtrelerin kullanılması, yağın partikül temizlik seviyesini ISO 4406 standardına göre 2-3 kademe iyileştirerek (örneğin, -/19/17'den -/16/14'e) pompa ve valf gibi kritik bileşenlerin ömrünü %30-70 oranında artırabilir [13]. Bu iyileşme, daha uzun yağ ve bileşen ömrü sağlayarak, hem yağ değişim sıklığını azaltır hem de yedek parça üretiminden kaynaklanan emisyonları düşürür.
- II. Yağ Durumu İzleme (Condition Monitoring):** Geleneksel zaman bazlı yağ değişimlerinden, yağın gerçek durumuna dayalı bakıma geçiş için periyodik yağ analizi esastır [14]. Kritik parametreler ve kabul edilebilir sınırları şunlardır:
 - Viskozite: Viskozitede başlangıç değerine göre $\pm\%10$ 'u aşan, özellikle artış yönündeki bir değişim, oksidasyon veya kirlenme gibi ciddi bir sorun işareti olarak değerlendirilmelidir.
 - Asit Sayısı (TAN): 2.0 mg KOH/g değerini aşması, yağın ileri seviyede oksidasyona uğradığını gösterir.
 - Su İçeriği: $>\%0.1$ oranı yağlama yeteneğini zayıflatır; $>\%0.5$ oranı ise kavitasyon ve hidrolik arıza riski oluşturur.

- Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR): Oksidasyon, nitrasyon ve katkı tükenmesini tespit eder.
- Kuantitatif Spektrometre: Metaller (aşınma) ve silikon (hava filtresi verimsizliği) gibi elementleri ppm seviyesinde ölçer.

Bu veriler ışığında durum bazlı bakım uygulayarak, geleneksel zaman bazlı değişim periyotlarının ötesine geçmek ve yağ ömrünü önemli ölçüde uzatmak mümkündür. Örneğin, optimizasyon ve sürekli izleme ile yağ ömrünün iki kata kadar uzatılabildiği durumlar rapor edilmiştir [14]. Bu durum, atık yağ miktarını, yeni yağ tüketimini ve bunlarla ilişkili karbon ayak izini kritik oranlarda azaltmanın en etkili yollarından biridir.

III. Yağ Ömrü Uzatici Katkı Maddeleri (Replenishment): Oksidasyon, yağ bozulmasının birincil nedenidir ve zamanla anti-oksidan katkı maddelerini tüketir. Yağ analizi ile katkı tükenmesi tespit edilen ancak henüz kritik kirlilik seviyelerine ulaşmamış yağlara, "yeniden canlandırıcı" (replenishment) katkı paketleri uygulanabilir. Bu paketler, tükenmiş olan spesifik katkıları (anti-oksidan, aşınma önleyici) takviye eder, böylece yağın kalan faydalı ömrünü kullanmasına olanak tanır. Örneğin, Fluitec'in Singapur Kimya Tesis'indeki bir uygulamasında, bir anti-oksidan paketinin, yağın Hızlandırılmış Oksidasyon Testi (RPVOT) değerini yeniden yükselterek kullanım ömrünü %30-50 oranında uzattığı rapor edilmiştir [5].

IV. Sistem Tasarımı ve Proaktif Bakım: Bu strateji, enerji verimliliğini ve yağ ömrünü doğrudan etkileyen temel faktörleri hedefler.

- Sızdırmazlık ve Kontaminasyon Kontrolü: O-ring, conta gibi sızdırmazlık elemanlarının düzenli kontrolü ve değişimi, ortamdan hidrolik sisteme hava, su ve partikül girişini engelleyerek yağın kirlenme ve oksidasyon hızını yavaşlatır [15].
- Termal Yönetim: Hidrolik yağ sıcaklığının 60°C'nin altında (ideal 45-55°C aralığı) tutulması kritik öneme sahiptir. Zira Arrhenius kuralı uyarınca, yağ sıcaklığındaki her ~10°C'lik artış, oksidasyon hızını yaklaşık iki katına çıkararak yağ ömrünü yarıya indirebilir.
- Enerji Verimli Bileşenler: Düşük verimli sabit debili pompaların, değişken debili pompalar (VFD) ile değiştirilmesi, sistemin ihtiyaç duyduğu anda ve miktarda enerji tüketmesini sağlayarak %20-40 seviyelerinde enerji tasarrufu ve dolayısıyla doğrudan karbon emisyonu azaltımı sağlayabilir [15].

5. ETKİN YAĞ YÖNETİMİ UYGULAMALARI

Etkin bir yağ yönetim programı, planlama, uygulama, izleme ve iyileştirme aşamalarını içeren sistematik bir döngüdür. Bu süreç, modern izleme teknolojileri ve veri analitiği ile desteklenerek karbon ayak izinde ölçülebilir azalmalar sağlayabilir [1, 4, 5].

5.1. Teknolojik Yaklaşımlar ve Proaktif İzleme

Modern yağ yönetimi, reaktif bakım anlayışından proaktif bir stratejiye geçişi gerektirir. Sensör tabanlı sürekli izleme sistemleri, yağ analizi verileri ve yapay zeka destekli karar destek sistemleri, bu stratejinin temel taşlarını oluşturur [4]. Bu sayede sorunlar ortaya çıkmadan önce tespit edilebilir ve bileşen ömrü ile enerji verimliliği optimize edilir.

5.1.1. Yağ Seçimi ve İzleme Parametreleri

Bu sürecin temelini doğru yağ seçimi ve düzenli izleme oluşturur:

- Yağ Seçimi: Ekipman üreticisinin (OEM) tavsiyeleri temel alınmalı, ancak enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik hedefleri kapsamında düşük sürtünme katsayılı, yüksek viskozite indeksi (HVI) ve uzun ömrü ile bilinen sentetik yağlar mutlaka değerlendirilmelidir [3, 12].
- İzleme Parametreleri: Yağın sağlıklı durumunu, kalan ömrünü ve sistem temizliğini belirlemek için aşağıdaki parametreler düzenli olarak izlenmelidir [4, 14]:

Temel Fizikokimyasal Özellikler:

- Viskozite (ASTM D445)
- Asit Sayısı (TAN) - ASTM D664
- Baz Sayısı (TBN) - ASTM D2896

Kontaminasyon Seviyeleri:

- Su İçeriği (ASTM D6304)
- Partikül Sayımı ve Temizlik Kodu (ISO 4406)
- Çözünmeyen Kirlilik: Membrane Patch Colorimetry (MPC - ASTM D7897), jel oluşumu ve çözünmeyen reçineleri tespit ederek filtre tıkanıklığı ve tortu oluşumu riskini erken safhada gösterir.

Kimyasal Bozulma ve Kalan Ömür Analizleri:

- FTIR Analizi (ASTM E2412): Oksidasyon, nitrasyon, sülfasyon seviyeleri ve katkı maddesi tükenmesini tespit eder.
- Oksidasyon Stabilitesi: Hızlandırılmış Oksidasyon Testi (RPVOT - ASTM D2272), yağın kalan anti-oksidan rezervini ve oksidasyona direnç gösterebileceği potansiyel ömrünü ölçer.
- Viskozite Stabilitesi: RULER (Remaining Useful Life Evaluation Routine - ASTM D6971) testi, FTIR'i tamamlayıcı olarak, özellikle aminik ve fenolik anti-oksidan katkıların kalan konsantrasyonunu doğrudan ölçer.

5.1.2. Filtrasyon

Filtre seçiminde "Beta Oranı (βY)" kritik öneme sahiptir. $\beta_{10}=200$ olan bir filtre, $10\mu m$ 'deki partiküllerin 200'de 199'unu (%99,5) yakalar demektir. Hedef, sistemin hassasiyetine göre $\beta Y \geq 200$ olan filtreler kullanmaktır [13].

5.1.3. Flushing

Flushing işlemi, yüksek debili pompalar ve yüksek verimli filtrasyon üniteleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu üniteler, flushing sırasında açığa çıkan yoğun kirliliği, kalıcı sistem filtrelerine zarar vermeden ve hedeflenen üstün temizlik seviyesine ulaşarak uzaklaştırmak için kullanılır. Hedeflenen temizlik seviyesi, sistemin çalışma basıncına bağlıdır. Örneğin, 350 bar çalışan bir servo hidrolik sistemde, hedef temizlik seviyesi ISO 4406'ya göre -/14/12 veya daha iyi olmalıdır [15].

5.1.4. Dehidrasyon

Hidrolik yağdaki suyun kontrol altına alınması, korozyon, yağlama yeteneği kaybı ve yağın hızlanmış oksidasyonu ile mücadelede kritik öneme sahiptir. Başlıca iki yöntem kullanılır:

- **Vakum Dehidrasyon:** Bu, çözülmüş suyu uzaklaştırmak için en etkili yöntemdir. Yağı ince bir film halinde vakum altına alarak suyun buharlaşma sıcaklığını önemli ölçüde düşürür ve düşük sıcaklıkta buharlaştırarak sistemden uzaklaştırır. Bu yöntemle, yağın su içeriği 100 ppm'in (%~0.01) altındaki seviyelere, yani doyumluk sınırının oldukça altına düşürülebilir [4]. Bu, yüksek basınçlı sistemlerde kavitezyon riskini ortadan kaldırmak ve yağ ömrünü maksimize etmek için altın standarttır.

- **Koalesan (Koalesans) Filtreler:** Bu filtreler, serbest haldeki ve emülsiyon halindeki suyu ayırmak için tasarlanmıştır. Su damlacıklarını birleştirerek (koalesans) büyütür ve yerçekimi etkisiyle sistem tabanına çökmesini sağlar. Ancak, yağın içinde moleküler düzeyde dağılmış halde bulunan çözünmüş suyu uzaklaştırmada etkisizdirler [4, 15]. Bu nedenle, koalesan filtreler genellikle vakum dehidratörler ile tamamlayıcı olarak kullanılır.

5.1.5. IoT ve Endüstri 4.0 Uygulamaları ile Akıllı Yağ Yönetimi

Geleneksel periyodik izleme yöntemlerinin yerini, sürekli veri toplama ve analizine dayalı akıllı sistemler almaktadır. Bu sistemler, bakım maliyetlerini düşürürken ekipman güvenilirliğini ve enerji verimliliğini artırmaktadır [4].

- **Gerçek Zamanlı Sensör Teknolojileri:** Sistemlere entegre edilen gömülü viskozimetreler, neme duyarlı kapasitans sensörleri, anlık partikül sayacılar ve dielektrik sabiti ölçen sensörler sayesinde yağın fiziksel ve kimyasal durumu sürekli olarak izlenebilmekte; viskozite, su içeriği, kirlilik seviyesi ve katkı maddesi tükenmesi gibi parametreler anlık takip edilebilmektedir [4].
- **Veri Analitiği ve Yapay Zeka (AI) ile Öngörücü Bakım:** Sensörlerden toplanan ham veriler, makine öğrenimi algoritmaları ile işlenerek sistem davranışının normal dışına çıkışları (anomali) tespit edilebilmektedir. Örneğin, yağ içindeki aşınma metal konsantrasyonlarında (demir (Fe) ve bakır (Cu)) makine öğrenimi modeli tarafından tespit edilen anormal bir artış, bir dişli çark veya yatakta meydana gelen aşınmanın çok erken bir uyarısı olabilmekte ve olası bir arıza öncesi müdahaleye olanak sağlamaktadır [4, 5].
- **Dijital İkiz (Digital Twin) ile Simülasyon ve Optimizasyon:** Fiziksel hidrolik sistemin gerçek zamanlı verilerle beslenen sanal bir kopyası (dijital ikiz) oluşturularak, farklı yağ türlerinin, filtre seçeneklerinin veya bakım stratejilerinin sistem ömrü, enerji verimliliği ve toplam sahip olma maliyeti üzerindeki etkisi, fiziksel sisteme zarar vermeden ve üretimi durdurmadan test edilebilir ve optimize edilebilir [4].

5.2. Geri Kazanım ve Bertaraf Stratejileri

Kullanılmış yağ, tehlikeli bir atık olarak sınıflandırılrsa da uygun şekilde işlendiğinde değerli bir kaynaktır [11]. Başlıca üç geri kazanım yöntemi bulunmaktadır:

- **Yeniden Rafinasyon:** En sürdürülebilir seçenektir. Bu proses, kullanılmış yağdaki kirlenici, oksitleri ve katkı kalıntılarını uzaklaştırarak, ham petrolden üretilen baz yağa eşdeğer kalitede (Grup I, II veya III) baz yağ üretir. Yeniden rafinasyon prosesi, 1 litre atık yağı işlerken, 1 litre yeni baz yağ üretmek için gereken enerjiden yaklaşık %70-85 daha az enerji tüketir [3, 11]. Bu, doğal kaynak korunumu ve karbon ayak izi azaltımı açısından kritik bir avantaj sağlar.
- **Enerji Geri Kazanımı:** Atık yağın çimento fırınlarında veya özel yakma tesislerinde yakıt olarak kullanılmasıdır. Yakma işlemi kontrollü koşullarda yapılırsa da, fosil kaynaklı karbon salınımına neden olduğu için karbon nötr bir yöntem değildir [11]. Bu yöntem, yeniden rafinasyona kıyasla daha düşük çevresel fayda sağlar.
- **İleri Fiziksel Arıtma:** Kimyasal katkı kullanılmadan, santrifüj, vakum dehidrasyon ve yüksek verimli filtrasyon gibi mekanik yöntemlerle yağın temizlenmesi işlemidir. Bu yöntem, yağın kimyasal yapısını yenilemez; sadece mekanik kirlilikleri ve suyu uzaklaştırır. Bu nedenle, temizlenen yağ orijinal uygulamasında kullanılamaz, ancak hidrolik yağ gibi daha az kritik uygulamalarda ikincil bir yağ olarak değerlendirilebilir [4, 11].

5.3. Uygulama Örneği ve Etki Analizi

Singapur'daki bir kimya tesisinde katkı teknolojisi kullanılarak yapılan uygulamada, 40.000 litrelik yağ rezervuarında özel katkı çözümü uygulanmıştır.

5.3.1. Temel Varsayımlar

Tesis: Chemical Plant — Singapur
Ekipman: Propylene Refrig Compressor
Yağ Tipi: Hidrolik
Rezervuar Hacmi: 40,000 litre
Mevcut Yağ Yaşı: 7 yıl
Beklenen Kalan Kullanım Ömrü: 3 yıl
Yeni Yağ Fiyatı: 4.80 EUR/litre
Çözüm: Özel Katkı (%3 uygulama oranı)

5.3.2. Özel Katkı Uygulaması ve Etki Tablosu

Bu uygulamamızda, endüstriyel yağların kullanımı ve değiştirilmesinde karbon ayak izini azaltmaya yönelik etkin yağ yönetimi yaklaşımı olarak özel katkı çözümü incelenmekte ve çevresel & finansal etkileri son kullanıcı uygulamaları üzerinden değerlendirilmektedir.

Tablo 2. Uygulama Hesaplamaları

Senaryo	Formül Açıklaması	Yağ Miktarı (Y)	Değişim Sayısı (D)	Toplam Yağ Tüketimi (TYT)	Emisyon Faktörü (EF)	Toplam CO ₂ e (TCO ₂ e)	Yıllık CO ₂ e (YCO ₂ e)
Normal	$TYT = Y \times D$; $TCO_2e = TYT \times EF$; $YCO_2e = TCO_2e / 10$	40	2	80	3,1	248	24,8
Katkılı	$TYT = Y \times D$; $TCO_2e = TYT \times EF$; $YCO_2e = TCO_2e / 10$	40	1	40	3,1	124	12,4
Tasarruf	$\Delta CO_2e = TCO_2e_{normal} - TCO_2e_{katkılı}$; $\Delta YCO_2e = \Delta CO_2e / 10$			40		124	12,4

Sonuçlar özetlenecek olursa, %52 maliyet tasarrufu, %50 CO₂e ve %60 yağ tüketimi azaltımı sağlanmıştır. Yıllık 19.200 EUR maliyet ve 12.400 kg CO₂e azaltımı sağlanmıştır. Hesaplamalar ISO 14040:2006 standardına göre yapılmıştır [5].

Tablo 3. Uygulama Sonuçları

Süre	Maliyet Tasarrufu (EUR)	CO ₂ e Azaltımı (kg)	Yağ Tüketimi Azalımı (litre)
Yıllık	19.200	12.400	4.000
3 Yıl	57.600	37.200	12.000
5 Yıl	96.000	62.000	20.000
10 Yıl	192.000	124.000	40.000

6. SONUÇ

Bu çalışma, sanayide etkin bir yağ yönetimi stratejisinin yalnızca çevresel bir zorunluluk olmadığını, aynı zamanda Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) gibi küresel regülasyonlar karşısında operasyonel maliyetleri düşüren ve rekabet gücünü koruyan stratejik bir yatırım olduğunu ortaya koymaktadır. Endüstriyel yağların yaşam döngüsü incelendiğinde, en önemli karbon azaltım fırsatlarının kullanım aşamasında bulunduğu görülmektedir.

Uygulamaya yönelik çözümler arasında yer alan gelişmiş filtrasyon sistemleri, sürekli yağ durumu izleme, yağ ömrünü uzatıcı teknolojiler ve veriye dayalı bakım kararları sayesinde; yağ tüketimi ve atık oluşumu %60'a varan oranlarda azaltılabilir, enerji verimliliği %5-15 seviyelerinde iyileştirilebilir ve ekipman ömrü ile güvenilirliği artırılarak plansız duruşların önüne geçilebilir.

Türkiye sanayisinin SKDM'ye uyum sürecinde atması gereken adımlar ise şunlardır: karbon hesaplama ve izleme altyapısının güçlendirilmesi, ISO 14067 gibi uluslararası standartların benimsenmesi, yağ yönetiminin bir maliyet merkezi olarak değil bir verimlilik merkezi olarak konumlandırılması ve özellikle KOBİ'ler için devlet destekli danışmanlık ile teşvik programlarının hayata geçirilmesi.

Sonuç olarak, gelecekte yapılacak çalışmaların; yapay zeka destekli dijital yağ yönetim platformlarının SKDM raporlaması ile entegrasyonu ve farklı sektörler için karbon azaltım potansiyellerinin detaylı yaşam döngüsü değerlendirmeleri üzerine odaklanması önerilmektedir. Bu sayede Türk sanayisi, sürdürülebilir rekabet avantajını elde ederken çevresel hedeflere de ulaşabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Holmberg, K. & Erdemir, A. (2019). The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally. Tribology International.
- [2] International Energy Agency (2022). Energy and Carbon Tracker.
- [3] Mang, T., & Dresel, W. (2007). Lubricants and Lubrication -- Second Edition. Wiley-VCH.
- [4] Mitterer, S. (2023). Condition-Based Oil Changes: Save Money and Protect the Environment. Machinery Lubrication.
- [5] Fluitec (2023). Value Impact Calculator Report -- ExxonMobil Singapore Chemical Plant.
- [6] European Commission (2021). Proposal for a Regulation establishing a carbon border adjustment mechanism.
- [7] İKV (2022). SKDM ve Türkiye'nin Uyum Süreci.
- [8] Erdiñç, M. & Yıldız, A. (2022). SKDM'nin Türk Sanayisine Etkileri. Ekonomi ve Çevre Dergisi.
- [9] T.C. Ticaret Bakanlığı (2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı.
- [10] TÜİK (2024). Ülke Gruplarına Göre Dış Ticaret, Ocak-Aralık 2024. Dış Ticaret İstatistikleri. <https://www.tuik.gov.tr>
- [11] MANG, T., Lubricants and Lubrication, Wiley-VCH, 2007
- [12] Johnson, M., & Peters, R. (2021). Life Cycle Assessment of Hydraulic Oils and Their Impact on System Efficiency. Journal of Cleaner Production, 298, 126755.
- [13] Pall Corporation (2022). Technical Bulletin: Filtration Selection for High-Pressure Hydraulic Systems.
- [14] Fitch, B. (2020). The Role of Oil Analysis in Sustainable Hydraulic System Operation. Practicing Oil Analysis Magazine.
- [15] Parker Hannifin Corp. (2020). Hydraulic Fluid Contamination Control Guide.

ÖZGEÇMİŞ

Dilşat ÇOLAK

1982 İstanbul doğumludur. Lise eğitimini Bakırköy Lisesi'nde tamamladıktan sonra, Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Makine Mühendisliği bölümünü bitirmiştir. İstanbul Üniversitesi'nde MBA derecesini almıştır. Kariyerine, Mert Teknik Fabrika Malzemeleri ve Ticaret A.Ş.'de mühendis olarak başlamış; buradaki 20 yıllık kariyer yolculuğunu Satış ve Pazarlama Direktörü olarak tamamlamıştır. Halen Toros Filtrasyon Sistemleri A.Ş.'de Genel Müdür olarak çalışmaktadır.