

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*

BİDGE Yayınları

**Yeni Nesil Otomotiv Teknolojileri: Emisyon Kontrolü ve
Sürdürülebilir Araç Yönetimi**

Editör: HASAN KOTEN

ISBN: yapıldı

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: -

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



Yeni Nesil Otomotiv Teknolojileri: Emisyon Kontrolü ve Sürdürülebilir Araç Yönetimi

Önsöz

Otomotiv sektörü, küresel ölçekte enerji tüketimi ve çevresel etkiler açısından en kritik endüstrilerden biri olarak öne çıkmaktadır. Artan çevresel farkındalık, sıkılaştıran emisyon regülasyonları ve sürdürülebilirlik hedefleri, bu sektörün köklü bir dönüşüm sürecine girmesine neden olmuştur. Bu dönüşüm yalnızca teknolojik gelişmelerle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda üretimden kullanım ömrü sonuna kadar araçların tüm yaşam döngüsünü kapsayan bütüncül bir yaklaşımı gerekli kılmaktadır. Bu kitap, otomotiv sektöründe yeşil dönüşüm sürecini farklı perspektiflerden ele alarak, hem teorik hem de uygulamaya yönelik önemli katkılar sunmayı amaçlamaktadır. Kitapta yer alan bölümler, bir yandan emisyonların azaltılmasına yönelik yenilikçi mühendislik çözümlerini incelerken, diğer yandan araçların kullanım ömrü sonrasındaki yönetimine odaklanarak sürdürülebilirlik kavramını geniş bir çerçevede değerlendirmektedir. Kitabın ilk bölümünde, otomotiv sektöründe yeşil dönüşüm kapsamında emisyon regülasyonları detaylı bir şekilde ele alınmakta ve bu regülasyonlara uyum sağlamak amacıyla geliştirilen su buharı enjeksiyonu gibi yenilikçi teknolojiler incelenmektedir. Su buharı enjeksiyonu, yanma sıcaklıklarını düşürerek NOx emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olup, içten yanmalı motorların çevresel performansını iyileştirmeye yönelik önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, söz konusu teknolojinin hem teorik temelleri hem de uygulama potansiyeli kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir. İkinci bölümde ise, ömrünü tamamlamış araçların (ELV – End-of-Life Vehicles) optimum yönetimi ele alınmakta ve bu süreç çevresel ve ekonomik boyutlarıyla birlikte analiz edilmektedir. Geri dönüşüm, yeniden kullanım ve atık minimizasyonu gibi stratejiler, döngüsel ekonomi yaklaşımı çerçevesinde değerlendirilmekte ve otomotiv sektöründe sürdürülebilirliğin sağlanmasına yönelik önemli çözüm yolları sunulmaktadır. Bu kitap, otomotiv mühendisliği alanında çalışan araştırmacılar, lisansüstü öğrenciler ve sektör profesyonelleri için güncel bir başvuru kaynağı olmayı hedeflemektedir. Sunulan çalışmalar, çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesi, emisyonların azaltılması ve kaynakların etkin kullanımı konularında farkındalık oluşturmaya amaçlamaktadır. Sonuç olarak, bu eser otomotiv sektörünün sürdürülebilir bir geleceğe doğru evrilmesinde önemli rol oynayan teknolojik ve bilimsel yaklaşımları bir araya getirmektedir. Kitabın, hem akademik dünyaya hem de endüstriyel uygulamalara katkı sağlaması ve bu alandaki yeni çalışmalara ilham vermesi en büyük temennimizdir.

Prof. Dr. Hasan KÖTEN
Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

İÇİNDEKİLER

SÜRDÜRÜLEBİLİR MOTOR TEKNOLOJİLERİNDE YAĞ VE YAKIT KATKILARI	1
---	---

MEHMET SİNAN

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM: EMİSYON REGÜLASYONLARI VE SU BUHARI ENJEKSİYONU	12
--	----

MEHMET SİNAN

ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ ARAÇLARIN OPTİMUM YÖNETİMİ: ÇEVRESEL VE EKONOMİK BİR YAKLAŞIM ..	25
---	----

MEHMET SİNAN

BÖLÜM 0

SÜRDÜRÜLEBİLİR MOTOR TEKNOLOJİLERİNDE YAĞ VE YAKIT KATKILARI

MEHMET SİNAN¹

Giriş

Modern içten yanmalı motorlar, artan performans beklentileri, yakıt ekonomisi gereksinimleri ve emisyon standartları doğrultusunda yüksek sıcaklık ve basınç koşulları altında çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu zorlu çalışma ortamı, motor yağları ve yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde ciddi bir yük oluşturmaktadır. Temel (katkısız) yağlar ve saf yakıtlar, oksidasyon direnci, termal kararlılık ve aşınma önleme açısından çoğu zaman bu gereksinimleri tek başına karşılayamamaktadır. Bu nedenle modern motor teknolojilerinde katkı maddeleri vazgeçilmez bir unsur hâline gelmiştir.

Motor yağlarına eklenen kimyasal katkı maddeleri, yağın performansını artırarak motor parçalarının korunmasını sağlamaktadır. Viskozite geliştiriciler, yağın farklı sıcaklıklarda uygun akışkanlık seviyesini korumasına yardımcı olmakta ve soğuk çalıştırma sırasında aşınmayı azaltmaktadır. Deterjan ve dispersan katkılar, yanma sonucu oluşan kurum, tortu ve asidik bileşiklerin motor içinde birikmesini engelleyerek temiz bir çalışma ortamı oluşturmaktadır. Aşınma önleyici ve sürtünme azaltıcı katkılar ise metal yüzeyler arasında koruyucu bir film tabakası oluşturarak mekanik kayıpları en aza indirmekte ve motor ömrünü uzatmaktadır.

Yakıt katkı maddeleri de motor performansı ve çevresel etkiler açısından önemli rol oynamaktadır. Oktan artırıcılar, benzinli motorlarda vuruntu oluşumunu önleyerek daha verimli ve dengeli bir yanma süreci sağlamaktadır. Setan artırıcılar, dizel motorlarda tutuşma gecikmesini azaltarak yanma kalitesini iyileştirmektedir. Temizleyici katkılar, enjektör ve supap yüzeylerinde biriken tortuları gidererek yakıt püskürtme kalitesini artırmakta ve yakıt tüketimini düşürmektedir. Ayrıca korozyon önleyici ve su tutucu katkılar, yakıt sisteminin uzun vadeli dayanıklılığını desteklemektedir.

Katkı maddelerinin çevresel etkileri de günümüzde önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Uygun katkı formülasyonları, yanma verimini artırarak karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve partikül madde emisyonlarını azaltmaktadır. Bununla birlikte bazı metal bazlı katkıların uzun vadede katalitik konvertörler üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceği bilinmektedir. Bu nedenle güncel çalışmalar, çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir katkı

Motor teknolojisindeki gelişmeler, daha sıkı toleranslar ve daha yüksek çalışma sıcaklıklarını beraberinde getirmiştir. Ham petrolün rafine edilmesiyle elde edilen baz yağlar

¹ Öğr. . Gör.; İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Teknik Bilimler MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü. ORCID No:0000-0001-5346-6814

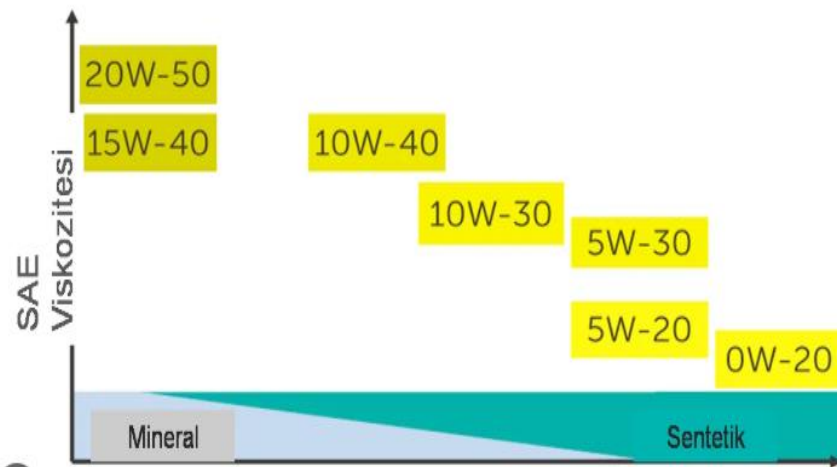
ve yakıtlar, tek başlarına korozyonu önleme, temizleme ve yağlama görevlerini tam olarak yerine getiremezler. Bu noktada devreye giren "katkı maddeleri", baz sıvının özelliklerini iyileştiren veya ona yeni özellikler kazandıran kimyasal bileşiklerdir (Stachowiak & Batchelor, 2014).

İçten yanmalı motorlar, artan performans talepleri, yakıt ekonomisi hedefleri ve giderek sıkılaştan çevre mevzuatları doğrultusunda yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışacak şekilde tasarlanmaktadır. Turboşarjlı sistemlerin yaygınlaşması, doğrudan enjeksiyon teknolojileri ve downsizing uygulamaları, motorların termal ve mekanik yüklerini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, motor yağları ve yakıtların yalnızca temel özelliklerinin yeterli olmamasına yol açmış; katkı maddelerini motor teknolojilerinin vazgeçilmez bir unsuru hâline getirmiştir.

Motor yağları, yalnızca sürtünmeyi azaltmakla kalmayıp aynı zamanda soğutma, sızdırmazlık sağlama, temizlik ve korozyon önleme gibi birçok kritik işlevi yerine getirmektedir. Ancak baz yağlar, yüksek sıcaklıkta oksidasyona uğrama, viskozite kaybı ve tortu oluşumu gibi olumsuzluklara karşı sınırlı dayanım göstermektedir. Bu nedenle çeşitli katkı maddeleri ile desteklenmektedir.

Motor Yağı Katkı Maddeleri

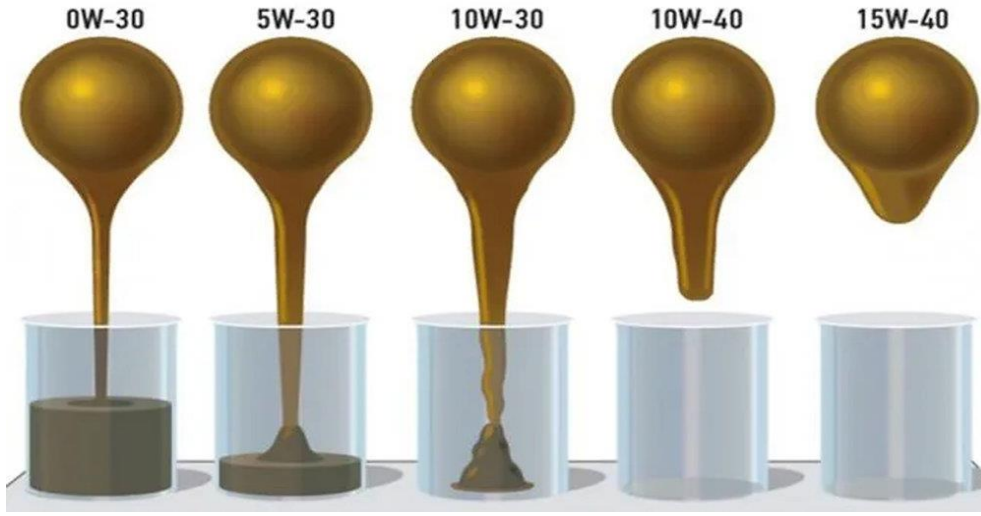
Motor yağı, %75-85 oranında baz yağdan ve %15-25 oranında katkı paketinden oluşur. Bu katkıların temel amacı sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı önlemek ve yağın ömrünü uzatmaktır. Modern içten yanmalı motor yağları, temelde iki ana bileşenden oluşur: baz yağ (base oil) ve katkı maddeleri (additives). Motor yağı formülasyonu, tipik olarak %75–85 oranında baz yağ ve %15–25 oranında katkı paketinden meydana gelir. Bu oranlar, katkı paketinin motor yağının performansını iyileştirmek ve motor parçalarını korumak için kritik önemde olduğunu göstermektedir. Bu oranlar çeşitli literatürde yaklaşık %75–90 aralığında verilmektedir; motor yağı üreticileri formülasyonlarını motor yüküne ve uygulama tipine göre optimize ederler (ör. yaklaşık %80 baz yağ ve %20 katkı maddesi) .



Şekil1: Yağ numaralarına göre yağ yapısı

Vizkozite İndeksi Geliştiriciler (Viscosity Index Improvers - VII)

Yağın sıcaklık değişimlerine karşı direncini artırır. Polimer yapılı bu maddeler, yüksek sıcaklıkta genişerek yağın çok incelmesini engeller. Rudnick (2017)'e göre, bu polimerler çok dereceli (örneğin 5W-30) yağların üretilmesini mümkün kılan temel bileşendir.



Şekil2: Motor yağ numaralarına göre vizkosite yapısı

Motor yağlarının performansını belirleyen temel özelliklerden biri viskozite indeksidir (VI). Viskozite indeksi, yağın viskozitesinin sıcaklık değişimine olan duyarlılığını gösterir; yüksek VI değeri, viskozitenin sıcaklıkla daha az değiştiği anlamına gelir (Wikipedia). Viskozite indeksi geliştiriciler (viscosity index improvers – VII’ler) bu özelliği kontrol etmeye yarayan yüksek moleküler ağırlıklı polimer katkılarıdır.

Polimer yapılı VII’ler soğuk ve sıcak koşullarda farklı davranış sergilerler. Düşük sıcaklıklarda polimer zincirleri moleküler olarak daha derli toplu ve çekik bir konformasyon sergiler; bu durumda polimerin baz yağın akışkanlığı üzerine etkisi sınırlıdır, bu da yağın soğukta yeterli akışkanlıkta kalmasını sağlar. Sıcaklık arttıkça, polimer molekülleri özgül hacimlerini artırarak genişler ve yağ molekülleri ile daha büyük etkileşim yüzeyleri oluşturur; bu da yüksek sıcaklıklarda yağın gereğinden fazla incelmesinin önüne (VI geliştirici polimerler sıcaklıkla şişer).

Bu “akıllı” mekanizma sayesinde motor yağı, tek bir formülasyonla hem soğukta kolay pompalanabilir hem de sıcaklık arttığında yeterli yağlama filmi kalınlığını koruyabilir. Böylece çok dereceli yağlar (örneğin SAE 5W-30) üretmek mümkün olur; bu yağlar hem düşük sıcaklıkta “5W” olarak akışkan, hem de çalışma sıcaklığında “30” viskozitesine sahip olacak şekilde formüle edilir (soğuk ve sıcak performansı aynı anda sağlar).

Rudnick (2017) tarafından derlenen *Lubricant Additives: Chemistry and Applications* gibi kapsamlı kaynaklarda, VII’lerin polimer yapısının ve moleküler özelliklerinin yağın viskozite-sıcaklık davranışını düzenlemedeki kritik rolü açık olarak vurgulanmaktadır. Bu çalışmada, polimerik katkıların motor yağının viskozite indeksini artırarak çok dereceli yağların geliştirilmesinde temel bileşen oldukları ifade edilmektedir (Rudnick, 2017). Polimer yapılı VI geliştiriciler tipik olarak olefin kopolimerleri, polimetakrilatlar ve hidrojenli styren-diye bazlı polimerler gibi yüksek moleküler ağırlıklı organizmalardır ve moleküler yapılarının sıcaklıkla değişen viskoziteye adaptasyon sağlaması, bu katkıların etkisini belirler.

Deterjanlar ve Dağıtıcılar (Detergents and Dispersants)

Yanma sonucu oluşan kurum, asit ve çamurun metal yüzeylere yapışmasını engellerler.

- Deterjanlar: Genellikle kalsiyum veya magnezyum sülfonat içerirler ve asitleri nötralize ederler.
- Dağıtıcılar: Katı parçacıkları askıda tutarak (süspansiyon) yağ filtresine taşınmasını sağlarlar (Spikes, 2015).

Yanma süreci sırasında yakıt ve yağın yüksek sıcaklıkta parçalanması sonucu kurum (is), asidik bileşikler ve çamur (sludge) oluşur. Bu yanma yan ürünleri, özellikle piston, segman, silindir cidarı ve yatak yüzeyleri gibi metal bileşenlere yapışarak aşınma, korozyon ve performans kayıplarına neden olabilir. Bu olumsuz etkileri önlemek amacıyla motor yağlarında deterjan ve dağıtıcı (dispersant) katkı maddeleri kullanılır.



Şekil 3: Yanma sonucu oluşan motor içi kurum

Deterjan katkıları, genellikle kalsiyum veya magnezyum bazlı sülfonatlar, fenatlar ve salisilatlar içerir. Bu katkılar, yanma sonucu oluşan sülfürik ve nitrik asit gibi asidik bileşiklerini nötralize ederek yağın toplam baz numarasını (TBN) korur. Böylece metal yüzeylerde korozyon oluşumu engellenir ve motor parçalarının temiz kalması sağlanır. Ayrıca deterjanlar, yüksek sıcaklıklarda metal yüzeylere yapışma eğiliminde olan tortuların çözünmesine yardımcı olarak motor içi temizliği destekler (Spikes, 2015).

Dağıtıcı katkılar ise genellikle kül oluşturmeyen polimerik bileşiklerdir ve temel görevleri, kurum ve diğer katı yanma artıklarını yağ içerisinde süspansiyon halinde tutmaktır. Bu sayede parçacıklar birbirleriyle birleşerek çamur veya tortu oluşturamaz ve yağ devridaimi sırasında yağ filtresine taşınarak sistemden uzaklaştırılır. Dağıtıcıların etkinliği, özellikle dizel motorlarda ve uzun yağ değişim aralıklarında kritik öneme sahiptir (Spikes, 2015).

Aşınma Önleyiciler (Anti-wear Agents)

Aşınma önleyici katkı maddelerinin en bilinen ve yaygın kullanılan örneği Çinko Dialkilditiyofosfat (ZDDP) bileşiğidir. ZDDP, motor yağlarında hem aşınma önleyici (anti-wear) hem de antioksidan özellikleri nedeniyle uzun yıllardır kullanılmaktadır. Özellikle supap mekanizması, kam mili, segmanlar ve yataklar gibi yüksek temas basıncına maruz kalan motor parçalarının korunmasında kritik bir role sahiptir.

ZDDP, metal yüzeyler arasında doğrudan metal-metal temasının gerçekleştiği sınır yağlama koşullarında, yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerek mikroskobik ölçekte camsı-fosfat yapılı bir tribofilm oluşturur. Bu koruyucu film tabakası, kayma sırasında kendini yenileyebilen bir yapıya sahiptir ve yüzeyler arasındaki sürtünmeyi ve aşınmayı önemli ölçüde azaltır. Böylece motor bileşenlerinin servis ömrü uzatılır ve mekanik kayıplar minimize edilir (Spikes, 2004).



Şekil 4: Pistonlarda oluşan aşınmalar

Ayrıca ZDDP'nin termal olarak bozunması sonucunda oluşan fosfor ve kükürt içeren bileşikler, metal yüzeylerde enerji sönmüleyici bir tabaka oluşturarak adezif aşınma ve yüzey yırtılmalarını önler. Bununla birlikte, yüksek fosfor içeriğinin egzoz sonrası arıtma sistemleri (özellikle katalitik konvertörler) üzerinde olumsuz etkiler yaratabilmesi nedeniyle, modern motor yağlarında ZDDP miktarı emisyon regülasyonları doğrultusunda sınırlandırılmaktadır (Totten, 2017).

Yakıt Katkı Maddeleri

Yakıt katkıları, yanma verimliliğini artırmak, yakıt sistemini temiz tutmak ve motor performansını korumak amacıyla benzinli ve dizel motorlarda yakıtı ilave edilen kimyasal bileşiklerdir. Bu katkıları; enjektörler, emme supapları, yanma odası ve yakıt hatlarında biriken tortu, reçine ve karbon esaslı kalıntıların oluşumunu önleyerek sistemin temiz kalmasını sağlar.

Yakıt katkılarının önemli bir grubu olan deterjan katkıları, özellikle enjektör uçlarında ve emme supaplarında biriken karbon tortularını çözerek yakıtın daha iyi atomize olmasına katkı sağlar. Daha homojen yakıt-hava karışımı elde edilmesi, yanma sürecinin daha kontrollü gerçekleşmesine ve özgül yakıt tüketiminin azalmasına yardımcı olur. Bu durum aynı zamanda CO ve HC emisyonlarının düşürülmesini sağlar (Heywood, 2018).



Şekil 5: Hava yakıt karışımından önce motor girişinde oluşan kurum

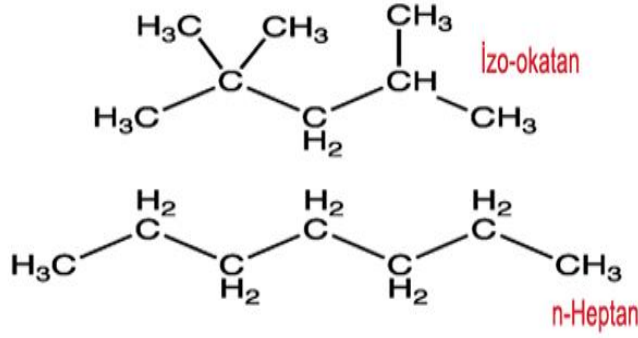
Setan sayısı artırıcı katkıları (dizel yakıtlarda), tutuşma gecikmesini azaltarak yanmanın daha erken ve düzgün başlamasını sağlar. Böylece motor gürültüsü azalır, soğuk çalıştırma performansı iyileşir ve partikül madde (PM) oluşumu sınırlandırılır. Benzer şekilde oktan sayısı artırıcı katkıları ise benzinli motorlarda vuruntu riskini azaltarak motorun daha yüksek sıkıştırma oranlarında güvenli çalışmasına olanak tanır (Speight, 2020).

Bunun yanında korozyon inhibitörleri, su tutucu (demulsifier) katkıları ve antioksidanlar, yakıt sistemindeki metal yüzeyleri korur, yakıtın oksidatif bozulmasını geciktirir ve depolama süresince yakıt kalitesinin korunmasını sağlar. Tüm bu katkı türleri birlikte değerlendirildiğinde, yakıt katkıları motorun uzun ömürlü, temiz ve verimli çalışmasında önemli bir rol üstlenmektedir.

Oktan ve Setan Artırıcıları

Benzinli motorlarda vuruntu (knocking) olgusunun önlenmesi amacıyla oktan sayısı artırıcı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Vuruntu, sıkıştırma strokunun sonunda yakıt-hava karışımının kontrolsüz ve kendiliğinden tutuşması sonucu ortaya çıkar ve silindir içinde ani basınç yükselmelerine neden olarak motor bileşenlerinde mekanik zorlanma, güç kaybı ve uzun vadede hasar oluşturur. Oktan sayısı artırıcı katkıları, yakıtın oto-tutuşma direncini yükselterek yanmanın kontrollü ve buji ateşlemesine bağlı şekilde gerçekleşmesini sağlar. Bu sayede motor daha yüksek sıkıştırma oranlarında güvenli biçimde çalışabilir ve termodinamik çevrim verimi (özellikle Otto çevrimi) olumlu yönde etkilenir (Guibet, 1999).

Dizel motorlarda ise yanma süreci, yakıtın silindir içine püskürtülmesiyle başlayan kendiliğinden tutuşma prensibine dayanır. Bu bağlamda, dizel yakıtın setan sayısı, yakıtın tutuşma eğilimini ve tutuşma gecikme süresini belirleyen temel bir parametredir. Setan artırıcı katkıları, yakıtın kimyasal reaktivitesini yükselterek tutuşma gecikmesini kısaltır, böylece yanma daha erken ve düzenli başlar. Tutuşma gecikmesinin azalması; basınç artış hızını düşürerek motor gürültüsünü sınırlar, daha dengeli bir ısı salınımı sağlar ve dizel çevriminin etkinliğini artırır (Guibet, 1999).



Şekil 6: Oktan Setan bağlantı yapısı

Her iki motor tipinde de oktan ve setan sayısını iyileştiren katkıları, yanma fazının krank mili açısına daha uygun bir zamanlamada gerçekleşmesini sağlayarak maksimum silindir basıncının ideal noktaya yaklaşmasına katkıda bulunur. Bu durum, özgül yakıt tüketiminin azalmasına, mekanik kayıpların düşmesine ve egzoz emisyonlarının iyileştirilmesine olanak tanır. Dolayısıyla oktan ve setan artırıcı katkıları, yalnızca motor koruması açısından değil, aynı zamanda motorun termodinamik verimliliğini doğrudan etkileyen kritik yakıt parametreleri olarak değerlendirilmektedir.

Tortu Kontrol Katkıları (Deposit Control Additives)

Yakıt sisteminde kullanılan yakıt katkıları ve deterjan özellikli bileşenler, enjektörler ve emme valfleri üzerinde oluşan karbon ve reçinemi tortuların oluşumunu önlemede önemli rol oynar. Bu tortular, özellikle düşük kaliteli yakıt kullanımı, kısa mesafeli sürüşler ve eksik yanma koşulları sonucunda zamanla birikerek yakıt sisteminin verimli çalışmasını olumsuz etkiler.

Enjektörlerde karbon birikmesi, yakıtın püskürtme karakteristiğini bozarak damlacık çapının büyümesine ve püskürtme açısının daralmasına neden olur. Bu durum, silindir içerisindeki yakıt-hava karışımının homojenliğini azaltır ve yanma sürecinin düzensiz gerçekleşmesine yol açar. Sonuç olarak özgül yakıt tüketimi artar, motor performansı düşer ve karbon monoksit (CO), hidrokarbon (HC) ve partikül madde (PM) emisyonları yükselir (Heywood, 2018).

Benzer şekilde emme valflerinde oluşan karbon birikintileri, hava akış kesitini daraltarak silindire giren hava miktarını sınırlar. Bu durum volumetrik verimi düşürür ve özellikle doğrudan enjeksiyonlu benzinli motorlarda ciddi performans ve emisyon problemlerine yol açabilir. Düzenli olarak kullanılan yakıt katkıları, bu tür birikintilerin çözünmesini sağlayarak enjektörlerin tasarlanan püskürtme formunda çalışmasına ve motorun daha temiz, verimli ve çevreci bir şekilde işletilmesine katkı sağlar (Speight, 2020).

Korozyon Önleyiciler ve Demülsifikatörler

Yakıt deposunda ve hatlarında paslanmayı önlerler. Demülsifikatörler ise yakıtı karışan suyun ayrışmasını sağlayarak suyun motora zarar vermesini engeller.

Yakıt sistemlerinde kullanılan korozyon inhibitörü katkıları, yakıt deposu, yakıt hatları, pompa ve enjektör gibi metal bileşenlerde paslanma ve oksidatif korozyon oluşumunu önlemek

amacıyla geliştirilmiştir. Yakıt içerisinde çözünebilen bu katkıları, metal yüzeylerde ince bir koruyucu film tabakası oluşturarak oksijen, nem ve asidik bileşiklerin metal yüzeyle temasını sınırlar. Özellikle biyoyakıt içeren benzin ve dizel yakıtlar, higroskopik özellikleri nedeniyle su tutma eğiliminde olduğundan, korozyon riski artmakta ve bu katkıların önemi daha da belirgin hale gelmektedir (Speight, 2020).



Şekil 7: Motor içi oluşan korozyon

Demülsifikatör katkıları ise yakıt içerisinde karışan suyun yakıt fazı içerisinde dağılmış (emülsiyon halinde) kalmasını önleyerek, suyun ayrışmasını ve çökmesini sağlar. Böylece serbest suyun yakıt filtresinde veya su ayırıcı sistemlerde tutulması mümkün olur. Yakıtlarla birlikte motora ulaşan su; enjektör iğnelerinde aşınmaya, yanma düzensizliklerine, kavitasyona ve düşük sıcaklıklarda donma riskine neden olabileceğinden, demülsifikatörler motor güvenliği açısından kritik bir rol üstlenir. Ayrıca suyun yakıt içerisinde çözünmeden ayrılması, mikrobiyal büyümenin ve buna bağlı çamur oluşumunun da önüne geçer (Totten, 2017).

Çevresel Etkiler ve Gelecek Perspektifi

Katkı maddeleri sadece motoru korumakla kalmaz, aynı zamanda tam yanmayı teşvik ederek karbon monoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarını azaltır. Ancak, ZDDP gibi fosfor ve sülfür içeren bazı yağ katkılarının, araçların katalitik konvertörlerine zamanla zarar verebildiği bilinmektedir (Spikes, 2015). Bu nedenle, güncel araştırmalar "Düşük SAPS" (Düşük Sülfat Külü, Fosfor ve Sülfür) içeren biyobozunur katkı maddelerine odaklanmaktadır.

Katkı maddeleri, yalnızca motor bileşenlerini aşınma, korozyon ve tortu oluşumuna karşı korumakla kalmaz; aynı zamanda yanma sürecini iyileştirerek tam yanmayı teşvik eder. Özellikle deterjan, dağıtıcı ve yanma iyileştirici özelliklere sahip katkıları sayesinde yakıt-hava karışımı daha homojen hale gelir ve yanma odasında oluşan eksik yanma ürünleri azalır. Bu durum, karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarında kayda değer düşüşler sağlanmasına katkıda bulunur. Tam yanmanın desteklenmesi, hem yakıt verimliliğini artırmakta hem de egzoz gazlarının çevresel etkisini azaltmaktadır (Heywood, 2018).

Bununla birlikte, motor yağlarında yaygın olarak kullanılan Çinko Dialkilditiyofosfat (ZDDP) gibi fosfor ve sülfür içeren katkı maddelerinin, uzun vadede araçların egzoz sonrası arıtma sistemleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturabildiği bilinmektedir. ZDDP'nin yanma ve yağ tüketimi sonucu ortaya çıkan fosfor bileşikler, katalitik konvertör yüzeyinde birikerek aktif katalizör bölgelerini kaplar ve bu durum katalitik zehirlenme (catalyst poisoning) olarak

adlandırılır. Sonuç olarak katalitik konvertörün CO, HC ve NOx dönüşüm verimi düşer ve emisyon kontrol performansı zamanla zayıflar (Spikes, 2015).

Bu olumsuz etkiler nedeniyle, özellikle Euro 6, Euro 7 ve benzeri sıkı emisyon regülasyonlarının yürürlüğe girmesiyle birlikte motor yağı formülasyonlarında önemli bir dönüşüm yaşanmıştır. Güncel araştırmalar ve endüstriyel uygulamalar, “Düşük SAPS” (Low Sulphated Ash, Phosphorus and Sulphur) içeriğine sahip katkı maddelerine odaklanmaktadır. Düşük SAPS teknolojisi; katalitik konvertörler ve dizel partikül filtreleri (DPF) ile uyumlu olacak şekilde, kül oluşturmeyen veya biyobozunur katkıların kullanımını teşvik etmektedir. Bu sayede hem motorun aşınma direnci korunmakta hem de egzoz sonrası arıtma sistemlerinin ömrü uzatılmaktadır (Totten, 2017).

Ayrıca biyobozunur ve çevre dostu katkı maddeleri, yağın çevresel etkisini azaltarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlar. Bu yaklaşım, modern motor teknolojilerinde performans, dayanıklılık ve çevresel sorumluluk arasındaki dengenin sağlanması açısından kritik bir strateji olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç

Motor yağları ve yakıtlara eklenen katkı maddeleri, modern içten yanmalı motorların yüksek performans, uzun ömür ve düşük emisyon hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde yer alan bulgular, uygun katkı teknolojilerinin motor verimliliğini artırdığını, bakım maliyetlerini azalttığını ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda katkı maddelerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar, otomotiv sektörünün geleceği açısından büyük önem taşımaktadır.

Motor yağları ve yakıtlardaki katkı maddeleri, otomotiv mühendisliğinin görünmez kahramanlarıdır. Sürtünmeyi azaltarak enerji tasarrufu sağlarlar, parçaları temiz tutarak bakım maliyetlerini düşürürler ve emisyonları kontrol altında tutarak çevreye katkıda bulunurlar. Gelecekte, elektrikli araçlara geçiş olsa bile, hibrit sistemler ve aktarma organları için bu kimyasalların gelişimi önemini koruyacaktır.

Motor yağlarının geniş bir sıcaklık aralığında etkin biçimde çalışabilmesi, büyük ölçüde bu polimerik viskozite indeks geliştiricilerin varlığına ve performansına bağlıdır. Bu katkılar, motorun hem düşük sıcaklıklarda kolay çalıştırılmasını hem de yüksek sıcaklıklarda yeterli yağlama filmi kalınlığı sağlayarak aşınmayı minimize etmesini sağlar.

Deterjan ve dağıtıcı katkıların birlikte çalışması sayesinde motor yağları; metal yüzeyleri temiz tutar, aşınmayı azaltır, korozyonu önler ve motorun uzun süre verimli bir şekilde çalışmasına katkı sağlar.

ZDDP, motor yağlarında aşınmaya karşı en etkili katkı maddelerinden biri olup, uygun oranlarda kullanıldığında motorun kritik parçalarının korunmasını sağlayarak performans ve dayanıklılığı artırmaktadır.

Korozyon inhibitörleri ve demülsifikatör katkılar, yakıt sisteminin uzun ömürlü, güvenli ve verimli çalışmasını sağlayarak bakım maliyetlerini düşürür ve motor arızalarının önlenmesine katkıda bulunur.

Motor yağları ve yakıt sistemlerinde kullanılan katkı maddeleri, modern içten yanmalı motorların performans, dayanıklılık ve çevresel uyumluluk gereksinimlerini karşılamada

vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir. Aşınma önleyici katkıları arasında öne çıkan Çinko Dialkilditiyofosfat (ZDDP), özellikle yüksek temas basıncı ve sınır yağlama koşullarında metal yüzeyler üzerinde koruyucu bir tribofilm oluşturarak kritik motor bileşenlerinin aşınmasını etkin biçimde sınırlandırmaktadır. Uygun konsantrasyonlarda kullanıldığında, ZDDP motorun mekanik kayıplarını azaltmakta, çalışma güvenilirliğini artırmakta ve motorun servis ömrünü uzatarak uzun vadeli performans sürekliliği sağlamaktadır.

Korozyon inhibitörleri ve demülsifikatör katkıları, yakıt sisteminin yapısal bütünlüğünün korunmasında belirleyici bir etkiye sahiptir. Korozyon inhibitörleri metal yüzeyleri oksidatif ve elektrokimyasal bozulmaya karşı korurken, demülsifikatörler yakıt içerisinde karışan suyun ayrışmasını sağlayarak suyun enjektörler, pompalar ve yanma odası üzerinde oluşturabileceği mekanik ve kimyasal hasarların önüne geçmektedir. Bu katkıların birlikte çalışması, yakıt sisteminde tortu oluşumunu, paslanmayı ve düzensiz yanmayı azaltarak bakım aralıklarının uzatılmasına, arıza risklerinin düşürülmesine ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Dolayısıyla, hem motor yağı hem de yakıt katkı maddelerinin doğru seçimi ve dengeli formülasyonu; motor verimliliği, emisyon kontrolü ve sistem güvenilirliği açısından kritik bir mühendislik parametresi olarak değerlendirilmeli, özellikle güncel emisyon regülasyonları ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda düşük SAPS ve çevre dostu katkı teknolojilerine yönelim desteklenmelidir.

Kaynaklar

- Guibet, J. C. (1999). *Fuels and engines: Technology, energy, environment*. Éditions Technip.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Lacroix-Andrivet, O., Hubert-Roux, M., Loutelier Bourhis, C., Moualdi, S., & Mendes Siqueira, A. L. (2023). Characterization of base oil and additive oxidation products from formulated lubricant by ultra-high resolution mass spectrometry. *Lubricants*, 11(8), Article 345. <https://doi.org/10.3390/lubricants11080345>
- Purdue University Extension. (2025, June 24). *Engine oils and their filters*. <https://ag.purdue.edu/departement/extension/ppp/resources/ppp-124.html>
- Rudnick, L. R. (Ed.). (2017). *Lubricant additives: Chemistry and applications* (3rd ed.). CRC Press.
- Speight, J. G. (2020). *Fuels, chemicals and energy from biomass*. Elsevier.
- Speight, J. G. (2020). *The chemistry and technology of petroleum* (5th ed.). CRC Press.
- Spikes, H. (2004). The history and mechanisms of ZDDP. *Tribology Letters*, 17(3), 469–489. <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044495.26882.b5>
- Spikes, H. (2015). Friction modifier additives. *Tribology Letters*, 60(1), Article 5. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0589-z>
- Spikes, H. (2015). The history and mechanisms of lubricant additives. *Tribology Letters*, 60(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0582-7>
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Totten, G. E. (2017). *Handbook of lubrication and tribology: Volume I – Application and maintenance*. CRC Press.
- U.S. Department of Energy. (2015). *Lubricant formulations to enhance engine performance*. OSTI.
- Viscosity index. (n.d.). In *Wikipedia*. Retrieved February 2026, from https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity_index
- Viscosity index improvers. (n.d.). *Top Polymers*. Retrieved February 2026, from <https://www.toppolymers.com/viscosity-index-improvers-viis-why-theyre-the-unsung-hero-of-engine-oils/>
- Viskozite indeksi (VI). (n.d.). *Opet Fuchs Türkiye*. Retrieved February 2026, from <https://www.opetfuchs.com.tr/tr/viskozite-indeksi-vi>

BÖLÜM 0

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE YEŞİL DÖNÜŞÜM: EMİSYON REGÜLASYONLARI VE SU BUHARI ENJEKSİYONU

MEHMET SİNAN¹

Giriş

Küresel ısınma, hava kirliliği ve fosil yakıt kaynakların tükenmesi gibi sorunlar, otomotiv sektörünü sürdürülebilir odaklı bir dönüşüme zorlamaktadır.

Hava kirliliği, atmosfere yabancı maddelerin girişiyle oluşurken; yağış, rüzgâr, nem sıcaklık, basınç ve güneş radyasyonu gibi meteorolojik faktörler de bu durumu yaygın hale getirmektedir. Plansız kentleşmenin bir sonucu olarak, yeşil alanların yetersizliği ve her türlü amaç için kullanılan katı sıvı ve gaz yakıtlar da hava kirliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu kirliletiç unsurların başında kuşkusuz, fosil yakıt tüketimi yapan motorlu araçlar gelmektedir. Bu bağlamda, motorlu araçlarda ki “yanma” olayı, hava kirliliğinin önemli bir kısmını teşkil etmektedir. İçten yanmalı motorlarda bu yanma sonrası ortaya çıkan emisyonlar, tüm dünyanın mücadele ettiğı ciddi bir sorun haline gelmiştir.

Otomotiv sektöründe fosil yakıt kullanımını azaltmaya yönelik elektrikli, hibrit ve hidrojen yakıt hücreli araçlar gibi çeşitli “yeşil dönüşüm” çözümleri geliştirilmektedir. Emisyonları azaltmada en etkili yol, motor içi verimlilik artırıcı önlemler ile egzoz gazı arıtım sistemlerinin birlikte kullanılmasıdır. Elektronik kontrollü enjeksiyon, EGR ve katalitik konvertör gibi teknolojilerle zararlı emisyonlar önemli ölçüde azaltılmaktadır. Ayrıca, düşük kükürtlü yakıtlar ve biyoyakıt katkıları, emisyon kontrolünde önemli rol oynarken, su buharı enjeksiyonu gibi yenilikçi sistemler de NOx emisyonlarını sınırlamaktadır.

Düzenli araç bakımları ile daha temiz yanma sağlanabilirken, uzun vadede fosil yakıtlardan tamamen uzaklaşmak adına elektrikli ve karbon nötr teknolojilere geçiş zorunludur. Bu dönüşüm, sadece teknolojik gelişmelerle değil, aynı zamanda düzenleyici politikalar, teşvikler ve kamu bilinciyle desteklenmelidir. Uluslararası standartlara uyum, Ülkemizde emisyon kontrolünün kurumsallaşmasını hızlandıracaktır. Bu sayede, daha temiz ve sürdürülebilir bir ulaşım altyapısı mümkündür.

Günümüzde çevre sorunları, küresel ölçekte insanlığın karşı karşıya kaldığı en önemli tehditlerden biri haline gelmiştir. Özellikle hava kirliliği, hem insan sağlığına hem de ekosisteme olan olumsuz etkileri nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Hızla artan dünya nüfusunun, beraberinde getirdiğı sanayileşme ve kentleşme ile birlikte hava kalitesinde ciddi bozulmalara yol açmaktadır. Fosil yakıtların yoğun olarak kullanıldığı ulaşım, enerji üretimi ve sanayi gibi sektörler, atmosfere salınan zararlı gazların başlıca kaynaklarıdır. Bu olumsuz koşulları minimize etmek amacı ile alternatif güç kaynaklarına daha popüler bir tanımlama ile “Yeşil Dönüşüm”e yönelmiştir. Tam elektrikli hibrit veya Hidrojen yakıt hücreli çalışmalar tüm sektörün çalışma alanına dönüşmüş durumdadır. Oluşan bu emisyonları kontrol altında tutmak

¹ Öğr. . Gör.; İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Teknik Bilimler MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü. ORCID No:0000-0001-5346-6814

amacıyla hergün biraz daha geliştirilen standartlar yasal zorunluluklar uygulanmaya devam etmektedir

Enerji Tüketimi

Dünya genelindeki enerji tüketiminin büyük bir kısmı, petrol türevleri ve sentetik yakıtların yakılmasıyla karşılanmaktadır. Ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılan taşıtlar, ihtiyaç duydukları enerjiyi içten yanmalı motorlar aracılığıyla, büyük ölçüde fosil yakıtların kullanılmasıyla elde etmektedir. Ancak bu motorlarda genellikle tam yanma sağlanamamakta, bunun sonucunda çeşitli zararlı emisyonlar oluşmaktadır. Bu emisyonlar, başta hava kirliliği olmak üzere çevresel birçok soruna neden olmaktadır.

Fosil yakıtlar, Türkiye'nin toplam enerji tüketiminin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bu kapsamda akaryakıtlar (motorin, benzin, LPG), özellikle ulaştırma sektörünün temel enerji kaynağını teşkil etmektedir. Ancak bu tüketim aynı zamanda çevresel etkileri ve dışa bağımlılığı da artırmaktadır.(ETKB (2023))

Petrol Sanayi Derneği'nin (PETDER) 2023 yılı raporuna göre, aşağıdaki tabloda yer alan veriler Türkiye'de gerçekleşen akaryakıt tüketimini ortaya koymaktadır. 2023 yılı itibarıyla alternatif enerji kaynaklarıyla çalışan araçların sayısında artış olmasına rağmen, petrol türevli yakıtların tüketiminde belirgin bir artış yaşanmıştır.

Tablo1 2022-2023 yılları akaryakıt tüketimi

Yakıt Türü	2022 Tüketimi (milyon ton)	2023 Tüketimi (milyon ton)	Değişim (%)
Motorin (Dizel)	30,2	32,0	+6,0%
Benzin	4,0	5,0	+25,0%
LPG (Otogaz)	3,1	3,1	0,0%
Toplam	37,3	40,1	+7,5%

Yukarıdaki tabloda da görüldüğü gibi son yıllarda özellikle elektrikli araçların sayısı artmasına rağmen fosil yakıtlardaki tüketim artmaya devam etmektedir. kullanılan her yakıtın hava kirliliğine olan etkisi de özellikle metropollerde tehlikeli boyutlara ulaşmaktadır. Egzoz Emisyon standartları kısıtlamaları her geçen zaman azaltmaya devam etse de trafikteki mevcut araçların önemli bir kısmı belirli bir yaşın üzerindedir. Bu durum emisyon açısından tehlike boyutlarının üzerindedir.

Özellikle karayolu taşımacılığının ticari alandaki baskın rolü nedeniyle, dizel yakıt kullanan araçların akaryakıt tüketimindeki payı oldukça yüksektir. Yıllık motorin tüketimi yaklaşık 32 milyon ton seviyesine ulaşırken, benzinli araçların tüketimi yıllık ortalama 5 milyon ton civarındadır. Bu durum, ulaştırma sektörünün dizel motorlara olan bağımlılığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır

TÜİK verilerine göre 2024 yılı itibarıyla Türkiye’de yaklaşık 29 milyon motorlu kara taşıtı bulunmaktadır. Bunların yaklaşık %40’ı dizel yakıtlı, %35’i LPG’li, %25’i ise benzinlidir.(TÜİK (2024)) Ayrıca, 2023 yılında elektrikli araçların sayısında yaşanan artışa rağmen, benzin tüketimi bir önceki yıla göre %25 oranında artış göstermiştir. Motorin tüketiminde ise yalnızca %6’lık bir artış yaşanmasına rağmen, toplam tüketim miktarı benzin tüketiminin yaklaşık altı katına ulaşmıştır. Bu veriler, Türkiye’de fosil yakıtlara dayalı ulaşım sisteminin hâlen baskın olduğunu ve alternatif enerji kaynaklarının etkisinin sınırlı kaldığını göstermektedir.

Fosil yakıtlarda yanma ve emisyonlar

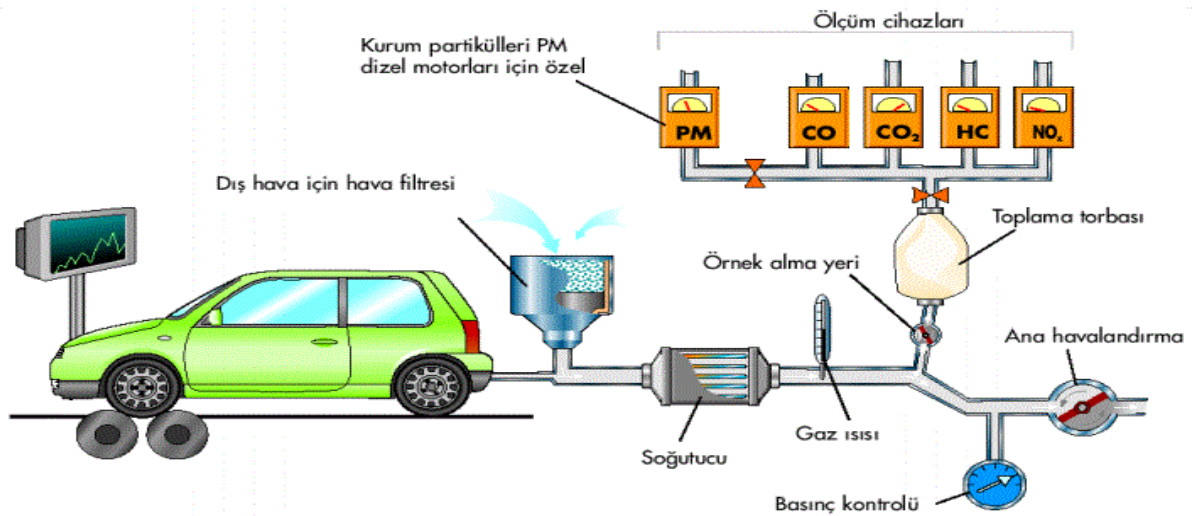
Enerji ihtiyacının karşılanmasında uzun yıllardır kullanılan fosil yakıtlar, içerdikleri karbon ve hidrojen elementleri sayesinde yüksek ısısal enerji sağlar. Ancak bu yakıtların yanma süreci, atmosferik kirleticilerin başlıca kaynaklarından biridir (Demirbaş, A. 2003).

Yanma Süreci: Temel Kimya

Fosil yakıtların bileşimi büyük oranda hidrokarbonlardan oluşur. Tipik bir yanma tepkimesi şu şekildedir:



İdeal yanma, yakıtın içerdiği karbon ve hidrojenin oksijenle tam olarak reaksiyona girerek yalnızca karbondioksit (CO₂) ve su (H₂O) oluşturduğu kimyasal süreçtir. Bu durum 1/14,7 Air/Fuel (hava-yakıt) oranı olarak tüm çalışmaların ana amacı olmuş durumdadır. Motorlarda kullanılan tüm elektronik entegre sistemler yaygın adıyla ECU (Elektronik Kontrol Üniteleri) bu karışım oranını elde etmek amacıyla uygun olarak tasarlanmıştır (Ekinci, A. 2017)



Şekil 1: egzoz emisyonları çeşitliliği

Tam yanma koşulları sağlanamazsa karbon monoksit (CO), uçucu organik bileşikler (HC) ve partikül maddeler gibi zararlı bileşenler ortaya çıkar (5). Ayrıca yüksek sıcaklıkta yanma, atmosferdeki azotun oksijenle reaksiyona girerek azot oksitleri (NO_x) oluşturmaya neden olur.

Tablo 2. 2022-2023 yılları akaryakıt tüketimi

Kirletici	Kaynak	Çevresel Etki
CO ₂	Tam yanma	Sera etkisi, küresel ısınma
CO	Eksik yanma	Zehirli gaz, insan sağlığına zarar
HC	Yanmamış yakıt	Zehirli gaz, insan sağlığına zarar
NO _x	Yüksek sıcaklıkta yanma	Asit yağmurları, ozon oluşumu
SO ₂	Kükürt içeren yakıtlar	Asit yağmurları, solunum hastalıkları
PM (Partikül madde)	Yanmamış karbon parçacıkları	Akciğer hastalıkları, kanser riski

yanma sonucu oluşan bu istenmeyen emisyonları kısaca tanımlayacak olursak

Karbondioksit (CO₂)

Karbondioksit (CO₂), doğrudan insan sağlığı üzerinde toksik bir etki yaratmasa da, çevresel açıdan son derece kritik bir sera gazıdır. Fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan CO₂'nin yaklaşık %50'si atmosferde birikmekte ve bu durum atmosferdeki CO₂ yoğunluğunu giderek artırmaktadır. Son 20 yılda salınan insan kaynaklı CO₂'nin yaklaşık dörtte üçü fosil yakıtların yakılmasından, geri kalanı ise ormansızlaşma gibi arazi kullanımındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır (Ekinci, A. 2017)

Karbonmonoksit (CO)

Karbonmonoksit (CO), eksik yanma sonucu oluşan, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Küresel CO emisyonlarının %70'inden fazlası ulaşım sektörüne aittir. CO'nun hemoglobine

bağlanma kapasitesi, oksijeninkinden yaklaşık 200 kat daha fazladır. Bu bağlanma, kandaki oksijen taşınmasını engeller, dokuların oksijen almasını önleyerek ciddi zehirlenmelere neden olabilir. Özellikle kalp hastalığı olan bireylerde bu durum ölümcül sonuçlara yol açabilir (Özcan, F. 2010).

Azot Oksitler (NO_x)

Azot oksitler (NO_x), yüksek sıcaklıklarda havadaki azot ve oksijenin tepkimeye girmesiyle oluşur. NO_x gazları, hemoglobine bağlanabildiği gibi, akciğerlerdeki nemle birleşerek nitrik asit (HNO₃) oluşturarak solunum yollarında tahrişe neden olur. Bu bileşiklerin uzun süreli maruziyeti, özellikle solunum sistemi hastalıkları ve akciğer kanseri riskini artırabilir. Ayrıca, NO_x gazları doymamış hidrokarbonlarla tepkimeye girerek kimyasal duman (smog) oluşumuna neden olur; bu da hava kirliliğini artıran önemli bir etkidir (Ekinci, A. 2017)

Hidrokarbonlar (HC)

Hidrokarbonlar (HC), içten yanmalı motorlarda yakıtın tam yanmaması nedeniyle oluşur. Zengin karışımla çalışan motorlarda yeterli oksijenin bulunmaması, fakir karışımlarda ise düşük sıcaklık ve cidara yakın bölgelerdeki alev sönmeleri HC oluşumunu artırmaktadır. Atmosferdeki HC bileşenleri, NO_x ile güneş ışığı altında tepkimeye girerek fotokimyasal duman (smog) oluşumuna neden olur. Bu durum özellikle yaz aylarında daha belirgindir. HC bileşenleri doğrudan zehirli olmasa da bazı türleri solunum yollarında tahrişe neden olabilir (Yıldız, A. 2020).

Partikül Maddeler (PM)

Partikül maddeler, içten yanmalı motorlardan çıkan is (karbon tanecikleri) şeklinde ortaya çıkar. Dizel motorlarda, yanma sırasında hidrojenin karbona göre daha aktif olması nedeniyle oksijen ilk olarak hidrojenle birleşir. Yeterli oksijen veya zaman bulunmadığında karbon yanmadan kalır ve egzoz yoluyla dışarı atılır. Bu parçacıklar solunum yoluyla vücuda girdiğinde ciddi sağlık sorunlarına ve hava kirliliğine yol açabilir (Ekinci, 2017).

Sanayileşmenin artması ve motorlu taşıt kullanımının yaygınlaşması ile birlikte çevre kirliliği küresel bir sorun haline gelmiştir. Özellikle içten yanmalı motorların çalışması sırasında ortaya çıkan egzoz emisyonları, hava kalitesinin bozulmasına ve iklim değişikliğine neden olan en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle, araçlardan kaynaklanan emisyonları sınırlandırmak amacıyla uluslararası düzeyde çeşitli emisyon standartları oluşturulmuştur. (European Commission., 2022)

Türkiye, 2009 yılından itibaren AB ile uyumlu olarak Euro emisyon standartlarını uygulamaya başlamıştır. Halihazırda yeni tescil edilen araçlarda Euro 6d-TEMP normu zorunlu kılınmıştır. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı bu uygulamalardan sorumludur. (European Commission., 2022)

Motorlu taşıtlar, şehir içi hava kirliliğinin başlıca kaynaklarından biridir. Avrupa Birliği, 1992 yılından itibaren "Euro" adını verdiği emisyon sınırlamaları ile araçlardan kaynaklanan kirlleticileri aşamalı olarak azaltmayı amaçlamaktadır. Bu standartlar, karbon monoksit (CO),

azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC), partikül madde (PM) ve karbondioksit (CO₂) gibi zararlı gazların emisyonlarını sınırlar.

Tablo 1. Avrupa Birliği Emisyon standartları

Euro Seviyesi	Yürürlük Yılı	Benzinli CO (g/km)	Dizel NO _x (g/km)	PM (g/km)
Euro 1	1992	2.72	-	-
Euro 2	1996	2.2	0.7	-
Euro 3	2000	2.3	0.5	-
Euro 4	2005	1.0	0.25	0.025
Euro 5	2009	1.0	0.18	0.005
Euro 6	2014	1.0	0.08	0.005

2025 yılında yürürlüğe girmesi planlanan Euro7 standartları elektrikli ve hibrit araçları da içerecek şekilde dizayn edilmeye devam etmektedir.

Dönüşümler ve Emisyon Regülasyonları

Otomotiv sektöründe son yılların gündemi iki ana kavram etrafında şekillenmektedir: “Çevre Kirliliği” ve “Dönüşüm”. Bu iki kavram birbirini tetiklemekte ve aynı zamanda otomotiv sektöründeki Ar-Ge çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. “DÖNÜŞÜM” kavramı. Artan olumsuz çevresel koşullar, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren paydaşları yeni çalışmalara yönlendirmiştir. Bu süreçte yapılan pek çok çalışma sonucunda inovatif fikirler ortaya çıkmıştır. Otomotiv sektöründe “Yeşil Dönüşüm” olarak ifade edilen birçok alternatif yaklaşım hayata geçirilmektedir. Tam elektrikli, hibrit veya hidrojen yakıt hücreli araçlar gibi, fosil yakıtların etkisini en aza indirmeyi hedefleyen çeşitli çalışmalar devam etmektedir

Enerji dönüşümü, karbon yoğun enerji kaynaklarından düşük karbonlu veya karbon nötr kaynaklara geçiş sürecidir. Bu süreç; güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi kaynakların kullanımını arttırmayı amaçlar (IEA. (2023). Elektrik üretiminde güneş ve rüzgârın payı her yıl artmakta, enerji depolama ve akıllı şebeke teknolojileri bu dönüşümü desteklemektedir.

Otomotiv sektörü de dönüşümün merkezinde yer almaktadır. Elektrikli araçlar (EV), hibrit sistemler ve hidrojen yakıt hücreli araçlar geleneksel içten yanmalı motorların yerine geçmektedir. Avrupa Birliği 2035 yılı itibariyle benzinli ve dizel araç satışlarını yasaklamayı planlamaktadır (Özcan, F. ,2010).

Tüm bu çalışmalar ileriye dönük üretim çalışmalarında daha düşük emisyon değerleri elde etmeye yönelik faaliyetler olarak değerlendirilebilir. Dönüşümler üretime yönelik çalışmalar mevcut araçların yaydığı emisyonların tehlikesini etkilememektedir. Mevcut

araçların ise yanma verimliliğini artırmak, zararlı gaz üretimini kaynağında azaltır. Yanma esnasında bu fonksiyonlar ise şu şekilde sıralanabilir

Yakıt Enjeksiyon Kontrolü

Elektronik olarak yönetilen sistemler, hava-yakıt oranını optimize eder (Heywood, J. B. 1988). Daha iyi ve etkin bir yanma sonucu istenmeyen emisyon değerleri minimize edilmiş olur.

EGR (Egzoz Gazı Devirdaimi)

Egzoz gazlarının bir kısmının tekrar yanma odasına gönderilmesiyle NO_x üretimi azaltılır (Karagöz, Y. (2022)). Dizel motorlarda özellikle yanma sonu sıcaklığı çok yüksek değerlere ulaşıldığından oluşan NO_x salınımını azaltmak amacı ile, egzoz gazlarının bir kısmını silindir içine gönderilir. Yanma kötüleştirilerek sıcaklık düşürülmüş olur

Ateşleme zamanlaması optimizasyonu

Yanma zamanının uygun şekilde ayarlanması ile CO ve HC salınımı düşer. (Karagöz, Y. (2022))

Yanma zamanının (ateşleme avansı ve püskürtme zamanlaması) motor çalışma koşullarına uygun şekilde ayarlanması, yanma veriminin artırılmasında ve egzoz emisyonlarının azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Ateşleme veya yakıt enjeksiyonunun piston üst ölü noktaya (ÜÖN) göre optimum konumda gerçekleştirilmesi, maksimum silindir basıncının uygun krank açısında oluşmasını sağlayarak yakıtın daha etkin şekilde yanmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, eksik yanma eğilimini azaltmakta ve karbon monoksit (CO) ile yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

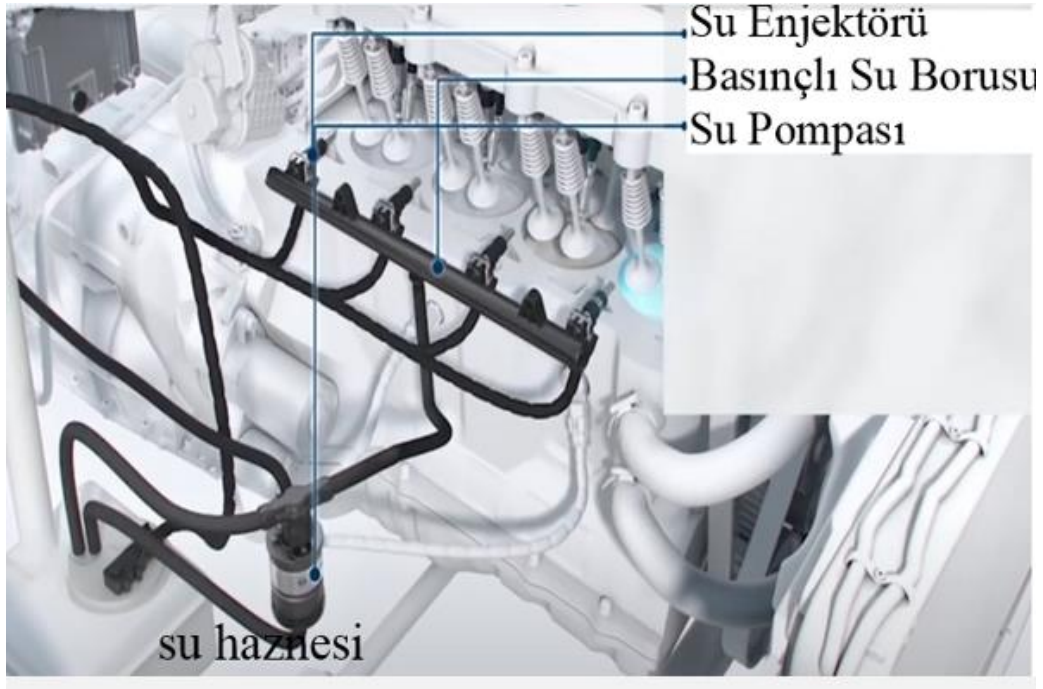
Yanma zamanlamasının gecikmesi durumunda, yanma süreci genişleme zamanına sarkmakta ve silindir içi sıcaklıklar düşmektedir. Bu durum, yakıtın tam oksidasyonunu engelleyerek CO ve HC oluşumunu artırmaktadır. Benzer şekilde, aşırı erken yanma zamanlaması ise vuruş eğilimini artırmakta ve yanma kararlılığını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle optimum yanma zamanlamasının belirlenmesi, performans ve emisyon kontrolü arasında hassas bir denge kurulmasını gerektirmektedir (Heywood, 1988; Turns, 2013).

Su Buharı Enjeksiyonu

Su buharı enjeksiyonu (Water Vapor Injection, WVI), yanma odasına belirli oranlarda suyun sıvı veya buhar fazında püskürtülmesi esasına dayanan bir emisyon kontrol yöntemidir. Bu yöntemde su, yanma süreci sırasında buharlaşarak ortamdan ısı absorbe etmekte ve silindir içi maksimum sıcaklığın düşürülmesini sağlamaktadır. Böylece sıcaklığa duyarlı emisyon bileşenlerinin oluşumu üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

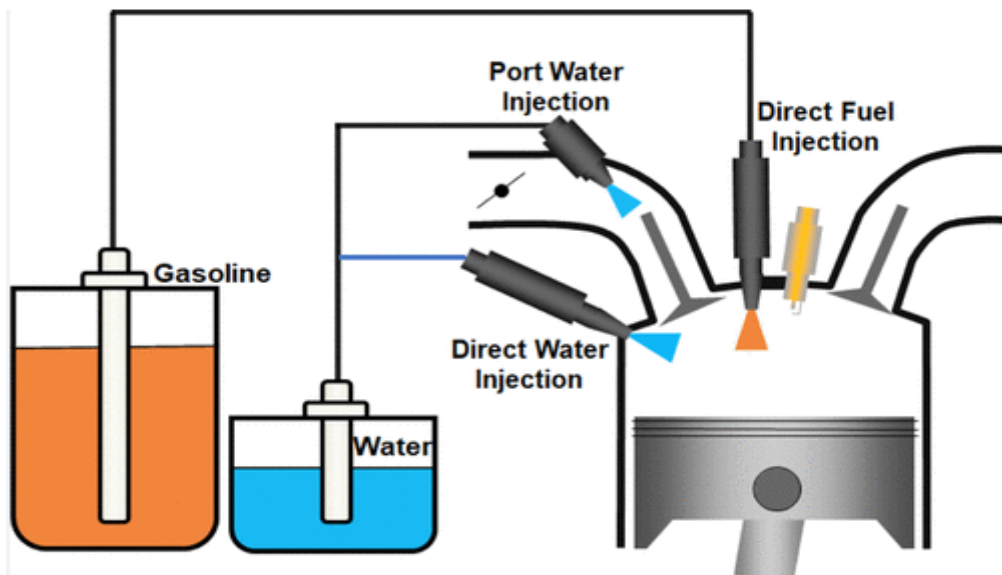
Bu uygulamanın egzoz emisyonlarına olan etkileri, literatürde farklı kirletici türleri açısından kapsamlı biçimde incelenmiştir. Öncelikle, yanma sıcaklığının düşürülmesi sayesinde termal NO_x oluşumu önemli ölçüde sınırlandırılmakta ve uygun su/hava oranlarında NO_x emisyonlarında %40–60 seviyelerine varan azalmalar rapor edilmektedir (Lefebvre & Ballal, 2010). Bununla birlikte, su enjeksiyonu yanma verimini belirli oranlarda

azaltabildiğinden, optimum seviyelerin aşılması durumunda karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarında %10–20'ye varan artışlar meydana gelebilmektedir (Basha & Anand, 2011; Turns, 2013).



Şekil2: su buharı enjeksiyonu

Dizel motor uygulamalarında ise WVI, yakıt atomizasyonunu iyileştirerek ve zengin karışım bölgelerini azaltarak kurum (soot) oluşumunu sınırlandırmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda, su/dizel oranının %20 seviyelerine kadar yükseltilmesi hâlinde partikül madde kütlesinde %30–50 oranında azalma sağlanabildiği belirtilmektedir (Johnson, 2009; Heywood, 1988).



Şekil3: püskürtme modeli

Ayrıca WVI sistemlerinin enjeksiyon zamanlaması, püskürtme basıncı, damlacık boyutu ve dağılım homojenliği gibi parametrelere bağlı olarak farklı performans ve emisyon sonuçları verdiği bilinmektedir. Bu nedenle modern motorlarda, su enjeksiyonu sistemleri elektronik kontrol üniteleri ile entegre edilerek motor yükü ve devir sayısına bağlı olarak dinamik biçimde yönetilmekte, böylece emisyon azaltımı ile motor verimi arasında optimum denge kurulması hedeflenmektedir.

Su buharı enjeksiyonu (Water Vapor Injection, WVI), yanma odasına su (sıvı veya buhar halinde) enjekte edilmesiyle çalışan bir yöntemdir. Bu uygulamanın emisyonlara etkisi, literatürde emisyon çeşitliliği açısından şöyle özetlenebilir

NOx emisyonları:

Su enjeksiyonu yanma sıcaklığını düşürerek NOx oluşumunu azaltır. Su/hava oranının %10'a kadar çıkarılmasıyla NOx emisyonlarının %40-60 oranında azalabileceği gösterilmiştir (Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R., 2010).

Su enjeksiyonu, yanma odasına kontrollü miktarda suyun püskürtülmesi yoluyla alev sıcaklığını düşüren etkili bir emisyon azaltma yöntemidir. Su, buharlaşma sırasında yüksek miktarda gizli ısı absorbe ederek yanma ortamındaki maksimum sıcaklığı azaltmakta ve böylece sıcaklığa duyarlı olan termal NOx oluşum mekanizmasını baskılamaktadır. Özellikle Zeldovich mekanizmasına bağlı olarak oluşan NOx emisyonları, yanma sıcaklığıyla doğrudan ilişkili olduğundan, sıcaklıktaki düşüş emisyon seviyelerinde belirgin bir azalma sağlamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalar, su/hava oranının %10 seviyelerine kadar artırılması durumunda, yanma stabilitesi korunarak NOx emisyonlarında yaklaşık %40–60 oranında azalma elde edilebildiğini ortaya koymaktadır (Lefebvre & Ballal, 2010). Bununla birlikte, su enjeksiyonunun yalnızca emisyonlar üzerinde değil, motor performansı üzerinde de etkileri bulunmaktadır. Uygun oranlarda uygulandığında vuruntu eğilimini azaltmakta ve daha yüksek sıkıştırma oranlarının kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ancak aşırı su enjeksiyonu, yanma gecikmesine, yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarının artmasına ve özgül yakıt tüketiminin yükselmesine neden olabilmektedir.

Ayrıca su enjeksiyonu sistemi; enjeksiyon zamanlaması, damlacık boyutu, püskürtme basıncı ve dağılım homojenliği gibi parametrelere bağlı olarak farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle sistemin motor karakteristiklerine uygun şekilde tasarlanması ve elektronik kontrol üniteleriyle optimize edilmesi, hem emisyon azaltımı hem de performans korunumu açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde su enjeksiyonu, özellikle ağır hizmet dizel motorları ve yüksek performanslı benzinli motorlarda, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) ve seçici katalitik indirgeme (SCR) gibi sistemlerle birlikte tamamlayıcı bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. (Turns, S. R. (2012).

CO ve HC emisyonları:

Yanma sıcaklığı düştüğünde yanma verimi azalabileceğinden CO (karbon monoksit) ve HC (hidrokarbon) emisyonları artabilir. Eksik yanma nedeniyle CO'da %10-20 artış raporlanmıştır. (Turns, S. R. (2012)

Su buharı enjeksiyonu uygulamalarında yanma ortamına ilave edilen suyun buharlaşması, silindir içi maksimum sıcaklığı düşürerek NOx oluşumunu sınırlandırırken,

belirli sınırların aşılması durumunda yanma veriminin azalmasına neden olabilmektedir. Yanma sıcaklığının düşmesi, yakıt-hava karışımının tutuşma ve oksidasyon süreçlerini yavaşlatmakta; bu durum özellikle karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonlarında artışa yol açmaktadır. Düşük sıcaklık koşullarında karbonun tam oksidasyonu gerçekleşmemekte ve CO'nun karbondioksit (CO_2) dönüşümü sınırlanmaktadır.

Deneyisel çalışmalar, su buharı enjeksiyonu oranının optimum seviyelerin üzerine çıkması hâlinde, eksik yanma eğiliminin arttığını ve CO emisyonlarında yaklaşık %10–20 oranında yükselme meydana geldiğini göstermektedir (Basha & Anand, 2011; Heywood, 1988). Benzer şekilde, düşük yanma sıcaklıkları alev yayılma hızını düşürerek yanmamış hidrokarbonların silindir dışına atılmasına neden olmakta ve HC emisyonlarının artmasına katkı sağlamaktadır (Turns, 2013).

Bu nedenle su buharı enjeksiyonu sistemlerinin tasarımında, NO_x azaltımı ile yanma verimi arasındaki dengenin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Enjeksiyon miktarı, zamanlaması ve dağılım homojenliği uygun şekilde ayarlanmadığı takdirde, emisyon kontrolünde sağlanan kazanımlar performans kayıplarıyla dengelenebilmektedir. Güncel motor kontrol sistemlerinde, su enjeksiyonunun elektronik kontrol üniteleri aracılığıyla yük ve devir koşullarına bağlı olarak dinamik biçimde düzenlenmesi, CO ve HC artışlarının sınırlandırılmasında etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

4.4.3. Partikül madde (PM):

Dizel motorlarda su enjeksiyonu kurum (soot) oluşumunu azaltır. Su/dizel oranı %20'ye kadar artırıldığında partikül kütleinde %30-50 azalma gözlenmiştir. (Basha, J. S., & Anand, R. B. 2011)

Dizel motorlarda su enjeksiyonu, yanma sürecinde silindir içi sıcaklık ve lokal oksijen dağılımını düzenleyerek kurum (soot) oluşumunun azaltılmasında etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Su, yanma ortamında buharlaşarak yakıt püskürtme jetinin atomizasyonunu iyileştirmekte, yakıt-hava karışımının homojenliğini artırmakta ve zengin karışım bölgelerinin oluşumunu sınırlandırmaktadır. Bu durum, özellikle difüzyon alevi bölgelerinde meydana gelen eksik yanma süreçlerini azaltarak partikül oluşum mekanizmasını baskılamaktadır.

Deneyisel çalışmalar, su/dizel oranının %20 seviyelerine kadar yükseltilmesi hâlinde, yanma stabilitesi korunarak partikül madde kütleinde yaklaşık %30–50 oranında azalma sağlanabildiğini göstermektedir (Basha & Anand, 2011; Johnson, 2009). Bununla birlikte, su enjeksiyonu sayesinde silindir içi sıcaklıkların düşmesi, kurum oksidasyon sürecini de destekleyerek oluşan partiküllerin egzoz çıkışına ulaşmadan önce kısmen parçalanmasına katkı sağlamaktadır (Heywood, 1988).

Ancak su enjeksiyonu oranının aşırı artırılması durumunda, yanma gecikmesinin uzaması ve alev sıcaklığının kritik seviyelerin altına düşmesi nedeniyle HC ve CO emisyonlarında artış meydana gelebilmektedir. Bu nedenle sistemin, motor yükü, devir sayısı ve püskürtme karakteristiklerine bağlı olarak optimize edilmesi gerekmektedir. Güncel dizel motor uygulamalarında su enjeksiyonu, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) ve dizel partikül filtresi (DPF) sistemleriyle birlikte kullanılarak, hem birincil hem de ikincil emisyon kontrol stratejisi olarak değerlendirilmektedir.

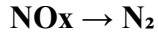
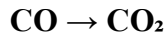
Egzoz Gazı Arıtım Sistemleri

Avrupa Birliği Euro normları, ABD EPA standartları ve Japonya'nın JP normları gibi uluslararası emisyon düzenlemeleri, motor üreticilerini egzoz emisyonlarını azaltmaya zorlamış ve bu doğrultuda çeşitli **egzoz gazı arıtım sistemlerinin** geliştirilmesini teşvik etmiştir. Bu sistemler, motor performansını mümkün olan en az etkiyle korurken emisyonları yasal sınırların altına indirmeyi hedefler. Katalitik konvertörler, dizel partikül filtreleri (DPF), seçici katalitik redüksiyon (SCR) sistemleri, oksidasyon katalizörleri (DOC) ve egzoz gazı devridaim (EGR) sistemleri gibi farklı teknolojiler, motor türüne ve hedef emisyona göre özelleştirilmiştir . (Majewski, W. A., & Khair, M. K. (2006)

Günümüzde kullanılan başlıca egzoz gazı arıtım sistemleri genel olarak belirtilmiş, çalışma prensipleri, etkinlikleri kısaca açıklanmıştır.

Katalitik konvertörler:

CO, HC ve NO_x bileşenlerini zararsız bileşiklere dönüştürür. Benzinli motorlarda yaygın. Üç zararlı gazı aynı anda azaltır:



Yüksek sıcaklıkta platin, paladyum veya rodyum gibi katalizörler görev alır. (Heywood, J. B. 1988).

Dizel Partikül Filtresi (DPF)

2.5 mikron altındaki partikülleri tutarak havaya salımını önler. Dizel motorlardan çıkan kurum (soot) partiküllerini tutar. Egzoz sıcaklığı belirli bir seviyeye ulaştığında “rejenerasyon” yaparak partikülleri yakar. Partikül emisyonunu %85-95 oranında azaltır. (Johnson, T. V. 2009).

SCR (Seçici Katalitik İndirgeme)

AdBlue gibi üre bazlı çözeltiler kullanılarak NO_x gazları su buharına ve azota dönüştürülür. NO_x emisyonlarını azaltmak için dizel motorlarda kullanılır. Egzoza üre (AdBlue) enjekte edilir; amonyak (NH₃) oluşur ve NO_x ile tepkimeye girerek zararsız N₂ ve H₂O üretir. NO_x'i %70-95 oranında azaltabilir. (Majewski, W. A., & Khair, M. K. ,2006)

Sonuçlar

Fosil yakıtlı motorların neden olduğu egzoz emisyonları, hem çevresel hem de halk sağlığı açısından ciddi sorunlar yaratmaktadır. Karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC), partikül madde (PM) ve karbondioksit (CO₂) gibi kirleticilerin atmosfere salımı, iklim değişikliği, hava kirliliği, asit yağmurları ve solunum yolu hastalıkları gibi çok

boyutlu sonuçlara yol açmaktadır. Bu bağlamda, bu motor teknolojilerinde zararlı gazların azaltılması, yalnızca teknik bir iyileştirme değil; aynı zamanda çevresel sürdürülebilirliğe, uluslararası emisyon standartlarına ve kamu sağlığına yönelik bir zorunluluktur.

Yapılan analizler göstermektedir ki, emisyon azaltımı için en etkili yol çoklu stratejilerin birlikte uygulanmasıdır. Öncelikle motor içi önlemlerle yakıtın daha verimli ve temiz bir şekilde yakılması, kaynakta emisyon oluşumunu azaltmaktadır. Elektronik kontrollü yakıt enjeksiyonu, egzoz gazı devirdaimi (EGR), ateşleme zamanlaması optimizasyonu gibi sistemler sayesinde motor performansı korunurken emisyon değerleri düşürülmektedir. Bununla birlikte, egzoz gazı arıtım sistemleri—örneğin katalitik konvertörler, dizel partikül filtreleri ve SCR sistemleri—yakıt yanması sonrası oluşan zararlı bileşenlerin atmosfere salınmasını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Yakıt kalitesinin artırılması da emisyon kontrolünde kritik rol oynamaktadır. Düşük kükürtlü yakıtların ve biyoyakıt katkılarının kullanımı, özellikle NO_x ve partikül emisyonlarını minimize etmektedir. Ayrıca, son yıllarda geliştirilen su buharı enjeksiyonu gibi yenilikçi uygulamalar, NO_x oluşumunun termodinamik olarak sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu tür yöntemler, geleneksel teknolojilere düşük maliyetli ve uygulanabilir çözümler sunarak geçiş sürecini kolaylaştırmaktadır.

Motorlu Taşıtların belirli periyotlarda yapılması gereken bakımlar aksatılmadığı takdirde iyi bir yanma elde edileceğinden emisyon salınımları da azaltılacaktır.

Uzun vadede yalnızca teknik önlemlerle sınırlı kalmak yeterli olmayacaktır. Fosil yakıt bağımlılığının azaltılması için elektrikli araçlar, hidrojen yakıt hücreli sistemler ve karbon nötr yakıt teknolojilerine geçiş kaçınılmazdır. Bu dönüşüm yalnızca mühendislik çabalarıyla değil, aynı zamanda regülasyonlar, teşvikler ve kamu bilinci ile desteklenmelidir. Uluslararası standartlara (Euro 6, Tier 3 vb.) uyumun artırılması, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde de emisyon kontrolünün kurumsallaşmasını hızlandıracaktır.

Fosil yakıtlı motorlarda zararlı gazların azaltılması teknik, çevresel ve politik boyutları olan karmaşık bir süreçtir. Mevcut sistemlerin iyileştirilmesi, yenilikçi çözümlerin teşvik edilmesi ve uzun vadeli politikalarla desteklenmesi sayesinde daha temiz, daha sağlıklı ve daha sürdürülebilir bir ulaşım altyapısı mümkün olacaktır.

Kaynaklar

- Basha, J. S., & Anand, R. B. (2011). Effects of water injection on emissions reduction in a DI diesel engine. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 36, 1407–1416.
- Demirbaş, A. (2003). Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions in Turkey. *Energy Conversion and Management*, 44(1), 203–213.
- Ekinci, A. (2017). Motorlu taşıtlarda egzoz emisyonları ve çevreye etkileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 30(3), 417–429.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). *Türkiye ulusal enerji planı ve 2053 net sıfır emisyon stratejisi*. ETKB.
- European Commission. (2021). *Fit for 55 package*. <https://ec.europa.eu>
- European Commission. (2022). *Vehicle emissions standards*. <https://ec.europa.eu>
- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. IEA.
- Johnson, T. V. (2009). Diesel emission control in review. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 1(1), 68–81.
- Karagöz, Y. (2022). Fosil yakıtlı motorlarda emisyon azaltımı için yenilikçi yaklaşımlar *Makina Mühendisliği Dergisi*, 31(4), 122–130.
- Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. (2010). *Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions* (3rd ed.). CRC Press.
- Majewski, W. A., & Khair, M. K. (2006). *Diesel emissions and their control*. SAE International.
- Özcan, F. (2010). *Buji ateşlemeli bir motorda LPG ve CNG (sıkıştırılmış doğalgaz) kullanımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- PETDER. (2023). *Akaryakıt ürünleri tüketim raporu 2023*. <https://www.petder.org.tr>
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2023). *Motorlu taşıtlarda emisyon uygulamaları raporu*.
- Türkiye İstatistik Kurumu. (2024). *Motorlu kara taşıtları istatistikleri*. TÜİK.
- Turns, S. R. (2013). *An introduction to combustion: Concepts and applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Yıldız, A. (2020). *İçten yanmalı motorlarda emisyonların oluşumu ve azaltılması* (Yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi.

BÖLÜM 0

ÖMRÜNÜ TAMAMLAMIŞ ARAÇLARIN OPTİMUM YÖNETİMİ: ÇEVRESEL VE EKONOMİK BİR YAKLAŞIM

Mehmet SİNAN ¹

Giriş

Motorlu taşıt sayısındaki hızlı artış, ömrünü tamamlamış araçların (ÖTA) çevresel ve ekonomik etkilerini önemli bir sürdürülebilirlik sorunu haline getirmiştir. Ömrünü tamamlamış araçların (ÖTA) etkin ve sürdürülebilir biçimde yönetilememesi; çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan önemli sorunlara yol açmaktadır. Bu araçların uygun yöntemlerle bertaraf edilmemesi durumunda, akü, motor yağı, soğutma sıvıları, fren hidroliği ve ağır metal içeren parçalar gibi tehlikeli atıklar çevreye kontrolsüz şekilde salınabilmekte; bu durum toprak, su ve hava kirliliğini artırarak insan sağlığı üzerinde ciddi riskler oluşturmaktadır. Ayrıca, araç gövdelerinde bulunan çelik, alüminyum, bakır, plastik ve cam gibi geri dönüştürülebilir malzemelerin yeterince değerlendirilmemesi, doğal kaynakların gereksiz tüketimine ve enerji israfına neden olmaktadır.

Bununla birlikte, kayıt dışı söküm ve hurda faaliyetleri; hem çevre mevzuatına aykırı uygulamaların yaygınlaşmasına hem de kayıt dışı ekonomi yoluyla devletin vergi kaybına uğramasına sebep olmaktadır. Bu tür uygulamalar, iş sağlığı ve güvenliği standartlarının ihlal edilmesine ve çalışanların tehlikeli maddelere maruz kalmasına da zemin hazırlamaktadır.

Ülkemizde ömrünü tamamlamış araçların optimum düzeyde değerlendirilmesi, sürdürülebilir atık yönetimi yaklaşımı çerçevesinde ele alınmıştır. Bu kapsamda öncelikle, araçlardan elde edilen malzemelerin geri dönüşümü ile ham madde ihtiyacının azaltılması ve enerji tasarrufu sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca, mekanik aksamlar, motor parçaları ve elektronik bileşenler gibi uygun durumda olan parçaların yeniden kullanım yoluyla ekonomiye kazandırılması, hem maliyetleri düşürmekte hem de ürün yaşam döngüsünü uzatmaktadır. Geri dönüştürülemeyen atıkların ise enerji geri kazanımı yöntemleriyle (örneğin yakma ve piroliz) değerlendirilmesi, atık miktarının azaltılmasına ve alternatif enerji üretimine katkı sunmaktadır.. Avrupa Birliği ve Türkiye uygulamaları karşılaştırılarak, sürdürülebilir bir ÖTA yönetim sistemi için politika önerileri sunulmuştur.

¹ Öğr. Gör., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, TBMYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü Orcid: 0000-0001-5346-6814

Sanayileşme ve kentleşme ile birlikte motorlu taşıt sayısı dünya genelinde hızla artmaktadır. Araçların ekonomik ömürlerini tamamlamaları sonucunda ortaya çıkan ömrünü tamamlamış araçlar, yüksek miktarda metal, plastik, cam ve tehlikeli atık içermektedir. Bu durum, ÖTA'ların çevreye zarar vermeden ve ekonomik değer kaybı yaşanmadan değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Optimum değerlendirme; yalnızca geri dönüşümü değil, aynı zamanda yeniden kullanım ve enerji geri kazanımını da kapsayan bütüncül bir yaklaşımı ifade etmektedir.

Türkiye’de Aktif Motorlu Araç Sayısı: Durum Analizi

Toplam Trafığe Kayıtlı Motorlu Araç Sayısı

2025 yılı sonu itibarıyla Türkiye’de trafikte kayıtlı toplam motorlu kara taşıtı sayısı 33.612.650 adede ulaşmıştır (Aralık 2025). Bu araçların büyük bir kısmını otomobiller ve motosikletler oluşturmaktadır. Trafığe kayıtlı taşıt sayısı, 2024 yılı sonuna göre yaklaşık 2.3 milyon adetlik net artış göstermiştir. Bu rakam, Türkiye’nin nüfusuna oranla yüksek bir araç parkına işaret etmekte olup, artış eğilimi özellikle son yıllarda sürmektedir.

Araç Tiplerine Göre Dağılım

33 milyondan fazla motorlu taşıtın türlere göre dağılımı şu şekildedir:

- Otomobil: %51,7
- Motosiklet: %21,2
- Kamyonet: %14,6
- Traktör: %6,9
- Kamyon: %3,1
- Minibüs: %1,6
- Otobüs: %0,6
- Özel amaçlı taşıtlar: %0,3

Bu dağılım, Türkiye’de bireysel ulaşımında otomobillerin hâlâ baskın rol oynadığını göstermektedir. Bununla birlikte motosiklet oranının önemli bir paya sahip olması, özellikle ekonomik ve pratik ulaşım tercihlerinin yaygınlığına işaret etmektedir.

Yeni Kayıtlar ve Araç Yaş Ortalaması

2025 yılında trafiğe kaydı yapılan toplam araç sayısı yaklaşık 2.368.538 adet olarak gerçekleşmiştir. Aynı dönemde trafikten kaydı silinen araç sayısı yaklaşık 55.907 adettir. Böylece agregede araç sayısında artış kaydedilmiştir.

Trafığe kayıtlı motorlu araçların ortalama yaşı 14,2 yıl olarak hesaplanmıştır; bu durum, araç parkının nispeten yaşlı olduğuna işaret eder. Özellikle ticari araçlarda ve traktörlerde bu yaş ortalaması daha yüksektir.

Araç Sayısında Zaman İçindeki Gelişim

2010'lu yılların başında trafik kayıtlı araç sayısı yaklaşık 24–25 milyon civarındaydı; 2020'lerin ortalarında bu sayı 30 milyon sınırını aşmış, 2025'te ise 33 milyonu geçmiştir. Bu dinamik, Türkiye'de ekonomik büyüme, ulaşım ihtiyacının artması ve bireysel araç edinme eğilimlerinin etkisiyle açıklanabilir.

Ayrıca 2023'te trafikteki araç sayısı yaklaşık 28.74 milyon olarak raporlanmıştı ve 2025 itibarıyla bu sayı 33 milyonun üzerine çıktı.

Özellikle pandemi döneminde üretim bantlarında ki durgunluk 2025 yılı itibari yerini çok büyük üretim sayılarına terk etmiştir. Hem Ülkemizde üretilen hem de ithal edilen motorlu taşıtlar rekor bir sayıyla hayatımızda yer almaya devam ediyorlar.



Kaynak: <https://tinyurl.com/45dkh9xh>

Otomotiv dünyasının ekosisteminde tüm yaşam alanlar gibi her eski araç bir nevi yerini yeni bir araca bırakmaktadır. Bu döğü ortaya muazzam bir geri dönüşüm ile beraber ekonomik bir canlılık bırakmaktadır. Kullanım süresi dolan her eşya her alet gibi motorlu taşıtlarda zamanı geldiğinde sahneyi terketmek durumundadırlar. Bu döğü ortaya yeni bir kavram olarak krşımıza çıkmaktadır, ÖTA ömrünü tamamlamış araçlar

Ömrünü Tamamlamış Araç Kavramı

Ömrünü tamamlamış araç (ÖTA), teknik, ekonomik veya hukuki nedenlerle trafikte güvenli, verimli ve yasal şekilde kullanılması mümkün olmayan motorlu taşıtları ifade etmektedir. Bu araçlar, kullanım ömürlerinin sonunda çevresel risk oluşturabilecek nitelikte atık hâline gelmekte ve özel mevzuat kapsamında geri dönüşüm süreçlerine dâhil edilmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2009).

Bu araçlar; motor, şanzıman, akü, lastik ve elektronik bileşenler gibi hem ekonomik değeri yüksek hem de çevresel olarak risk barındıran unsurlar içermektedir (European Commission, 2000). Yeniden kullanımı ve ekonomiye olan katkısı otomotiv sektörü açısından önem kazanmaktadır. Bir çok ömrünü tamamlamış araç komponentleri yedek parça olarak mudil araçlara hayat vermeye devam etmektedir.

Ömrünü tamalamış araçlar aşağıdaki sınıflandırma boyutu ile değerlendirilebilir.

Teknik nedenlerle ömrünü tamamlamış araçlar; Genel Aksam itibari ile bazı parametrelere bağlı olarak

- Dış aksam, şasi, motor, güç aktarma organları , fren sistemi gibi temel mekanik aksamlarında ciddi hasar bulunan,
- Günümüz Dünyasında gün geçtikçe hassalaşan Emisyon Standartlarını karşılamayan,
- Güvenli ve konforlu sürüş koşullarını sağlayamayan araçlardır.



Kaynak: <https://www.ayyildizgazetesi.com/hurda-resmi-arac-mezarligha-terkedildi>

Bu tür araçların onarımı teknik olarak mümkün olsa bile, güvenlik ve çevresel performans açısından yeterli seviyeye ulaşmaları çoğu zaman mümkün değildir (European Parliament & Council, 2000).

Ekonomik Açıdan Ömrünü Tamamlamış Araçlar: Bir aracın bakım ve onarım maliyetlerinin, araç değerini aşması durumunda ekonomik açıdan kullanımının sürdürülebilir olmadığı kabul edilmektedir. Özellikle yüksek yakıt tüketimi, yedek parça maliyetleri ve sık arıza riski, araçların ekonomik ömrünü tamamlamasına neden olmaktadır (Kılıç & Yılmaz, 2018). Mekanik ve motor aksamın kronikleşen problemlerine çözüm üretmek oldukça sıkıntılı bir durumdur. Birçok komponent ve yedek parçanın temini çoğu zaman mümkün

olamamaktadır. Yedek parça olarak genellikle çıkma diye tabir edilen kullanılmış parça kullanılarak kısa vadeli çözümler yapılabilmektedir. Bu durum bu araçların kullanımında ciddi tereddütler doğurmaktadır.

Hukuki Açıdan ÖTA Ülkemizde sıklıkla “Hurda Araçlar” olarak gündeme gelen Ömrünü Tamamlamış Araçlar (ÖTA)’ların yönetimi, “Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Hakkında Yönetmelik” ile düzenlenmiştir. Bu yönetmeliğe göre;

- Trafikten çekilmiş,
- Hurda belgesi düzenlenmiş,
- Yeniden trafiğe çıkması yasaklanan araçlar hukuki olarak ÖTA statüsüne girmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2009).

Avrupa Birliği’nde ise bu süreç, 2000/53/EC sayılı ELV (End-of-Life Vehicles) Direktifi kapsamında yürütülmektedir. Direktif, araçların çevreye zarar vermeden sökülmesini, geri kazanılmasını ve bertaraf edilmesini zorunlu kılmaktadır (European Parliament & Council, 2000).

Çevre Açısından Ömrünü Tamamlamış Araçlar

Ülkemizde büyükşehirler başta olmak üzere birçok ilimizde Araç mezarlığı haline gelen hurda araç yığınları bulunmaktadır. Her türlü tehdidi bulunduran bu “Araç Mezarlıkları”sağlık, çevre ve hava temizliğine direk olarak etki etmektedir.



Kaynak: <https://tinyurl.com/mnvhd7n>

Ömrünü tamamlamış araçların (ÖTA) mevzuata aykırı ve kontrolsüz şekilde bertaraf edilmesi, ciddi çevresel ve halk sağlığı riskleri doğurmaktadır. Bu araçlar; motor yağı, fren hidroliği, akü

asidi, ağır metaller ve soğutucu gazlar gibi tehlikeli maddeler içermektedir. Uygun olmayan söküm ve depolama süreçleri, bu zararlı bileşenlerin çevreye yayılmasına neden olmaktadır (European Parliament & Council, 2000).

Toprak ve Yeraltı Suyu Kirliliği

ÖTA'lerden sızan motor yağı, yakıt kalıntıları ve ağır metaller (kurşun, cıva, kadmiyum) toprağa karışarak toprak kalitesini düşürmekte ve tarımsal üretimi olumsuz etkilemektedir. Bu maddelerin yeraltı sularına sızması, içme suyu kaynaklarının kirlenmesine ve uzun vadede insan sağlığı üzerinde toksik etkilere yol açmaktadır (Demir & Aydın, 2021). Özellikle kontrolsüz hurda alanlarında bu risk daha da artmaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2009). Denetimsiz ve gelişigüzel oluşan metal birikintileri can damarımız toprak ve su üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır.

Hava Kirliliği

ÖTA'ların yakılması veya uygunsuz yöntemlerle parçalanması sonucu, atmosfere zararlı gazlar ve partikül maddeler salınmaktadır. Plastik, lastik ve boya kaplamalarının yanması; dioksin, furan ve karbon monoksit gibi toksik bileşiklerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, solunum yolu hastalıklarının artmasına ve hava kalitesinin bozulmasına yol açmaktadır (Kılıç & Yılmaz, 2018). Dönem dönem oluşan yangınlar sızan yağ ve yakıt soluduğumuz hava ile birleşerek sağlık açısından sıkıntılar oluşturmaktadır.

Tehlikeli Atıkların Yayılması

Akülerde bulunan sülfürik asit, klima sistemlerindeki soğutucu gazlar ve araç içindeki elektronik bileşenlerde yer alan ağır metaller, kontrolsüz bertaraf sürecinde çevreye yayılabilmektedir. Bu maddeler hem ekosistem üzerinde kalıcı tahribata neden olmakta hem de biyolojik birikim yoluyla insan sağlığını tehdit etmektedir (European Parliament & Council, 2000; Demir & Aydın, 2021). Özellikle geri dönüştürülmemiş bataryalar paslanmış metaller hem toprağı hem de havayı kirleten parametreler olarak öne çıkmaktadır.

Ömrünü Tamamlamış Araçlar'ın (ÖTA) sürdürülebilirlik çerçevesinde optimum düzeyde değerlendirilmesi hem çevre hem de ekonomik açıdan çok önemlidir. Ülkemizde bu araçların birkaç farklı metotla değerlendirilmekte olduğu bilinmektedir.

Yeniden Kullanım

Araçlardan sökülen motor, şanzıman, alternatör ve elektronik parçalar, belirli standartlar sağlandığında yeniden kullanılabilir. Bu yaklaşım, hammadde tüketimini azaltırken ekonomik katma değer sağlamaktadır. Aynı zamanda "çıkmacı" diye tanımlanan bir sektör meydana getirmiştir.

Araçlardan sökülen motor, şanzıman, alternatör, marş motoru, lastik tekerlekler ve diğer mekanik–elektronik bileşenler, belirli kalite ve güvenlik standartlarını sağlamaları

koşuluyla yeniden kullanıma sokulmaktadır. Bu süreçte parçalar; söküm, temizlik, hasar tespiti, ölçüm, test ve gerekiyorsa parça değişimi aşamalarından geçirilerek yeniden piyasaya sunulur. Özellikle motor ve şanzıman gibi yüksek maliyetli bileşenlerin yeniden değerlendirilmesi, hem üretim maliyetlerini düşürmekte hem de yeni parça üretimi için gereken enerji ve hammadde ihtiyacını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Yeniden kullanılan parçalar, uluslararası kalite standartlarına (örneğin ISO 9001, ISO 14001 ve otomotiv sektörüne özgü teknik normlar) uygun olarak test edildiğinde, performans ve güvenlik açısından yeni parçalarla karşılaştırılabilir seviyelere ulaşmasada belirli bir periyotta çözüm sağlayabilmektedirler. Bu durum, tüketiciler için daha uygun maliyetli yedek parça seçenekleri sunarken, otomotiv servis ve bakım sektöründe ekonomik sürdürülebilirliği de desteklemektedir.

Çevresel açıdan bakıldığında, bu yaklaşım doğal kaynakların korunmasına, atık miktarının azaltılmasına ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlar. Yeni bir motor veya elektronik bileşenin üretimi için gereken metal, plastik ve nadir elementlerin çıkarılması; madencilik faaliyetleri, enerji tüketimi ve çevresel tahribat gibi olumsuz etkiler doğurur. Oysa mevcut parçaların yeniden kullanılması, bu etkilerin büyük ölçüde önüne geçmektedir.

Ekonomik açıdan ise yeniden kullanım uygulamaları; geri dönüşüm sektörü, yedek parça pazarı ve yeniden imalat sanayisi için önemli bir katma değer yaratır. İstihdam olanaklarını artırırken, ithal yedek parça bağımlılığını azaltarak ülke ekonomisine de katkı sağlar. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, uygun fiyatlı ve güvenilir ikinci el veya yenilenmiş parçalar, araç bakım maliyetlerini düşürerek bireysel ve ticari kullanıcılar için erişilebilirliği artırmaktadır.

Ömrünü Tamamlamış Araçların Geri Dönüşüm

Çelik, alüminyum ve bakır gibi metallerin geri dönüşümü, enerji tasarrufu açısından büyük önem taşımaktadır. Bir ton çeliğin geri dönüşümü ile yaklaşık %70 enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Eurostat, 2022).



Kaynak <https://tinyurl.com/5fwbw5sz>

Ömrünü Tamamlamış Araçların geri dönüşümü, çevresel risklerin azaltılması, doğal kaynakların korunması ve ekonomik değer yaratılması açısından kritik bir süreçtir. Bu süreç, uluslararası çapta “End-of-Life Vehicle (ELV) recycling” olarak literatürde yer almakta olup, hukuki düzenlemelerle de desteklenmektedir (ELV Directive; Avrupa Parlamentosu ve Konseyi, 2000) .

Ön Arındırma (Depollution)

Ön arındırma aşaması, hurda aracın geri dönüşüm zincirindeki ilk ve çevresel açıdan en kritik adımdır. Bu aşamada araç, tehlikeli maddelerden arındırılır:

- Sıvılar: Yakıt, motor yağı, fren hidroliği, soğutma sıvısı, klima gazları gibi organik ve toksik sıvılar özel ekipmanlarla araçtan boşaltılır.
- Aküler ve Hava Yastığı Sistemleri: Akü, hava yastığı gibi patlayıcı veya kimyasal risk içeren parçalar güvenli şekilde sökülür.
- Tehlikeli Bileşenler: Katalitik konvertör gibi ağır metaller içeren parçalar ayrıştırılır.

Bu ön arındırma işlemleri, çevresel kirlenmenin önlenmesi, toprağa ve yeraltı sularına toksik madde sızıntısının engellenmesi açısından zorunludur. Geri dönüşüm sistemlerinin düzenli ve çevre standartlarına uygun çalışması için, araç sahipleri hurda araçlarını lisanslı ÖTA (Ömrünü Tamamlamış Araç) tesislerine teslim ederler ve bu süreç belgelenir; bu ise ilgili yönetmelikler ve kayıt sistemleri ile takip edilir .

Parça Sökümü ve Yeniden Kullanım (Dismantling and Reuse)

Ön arındırma sonrası, araç işlevsel parçalarına ayrılır. Bu aşama parçalama öncesi yapılan önemli bir geri kazanım adımıdır:

- Yüksek Değerli Parçalar: Motor, şanzıman, alternatör, elektronik kontrol üniteleri (ECU), far grubu, şanzıman gibi mekanik-elektronik bileşenler, çalışma koşullarında test edilir ve yeniden kullanım için ayrılır.
- Test ve Depolama: Çalışabilirliği onaylanan parçalar barkodlanarak kayıt altına alınır ve ikinci el pazarına veya yedek parça sektörüne sunulur. Bu uygulama, yedek parça maliyetlerini düşürürken doğal kaynak ihtiyacını da azaltır .

Akademik literatürde de bu aşama, ELV geri dönüşümünün “dismantling” olarak adlandırılan kısmıdır ve parça sökümünün, toplam geri dönüşüm verimliliğini ciddi şekilde artırdığı vurgulanır (Simic, 2012) .

Parçalama (Shredding)

Parça sökümü sonrası geriye kalan araç kabuğu ve malzemeler, parçalama tesislerine gönderilir. Parçalama aşaması şu şekilde işler:

- Şasi ve Gövde Parçalama: Hurda araç gövdesi büyük pres ve kırma makineleriyle küçük parçalara ayrılır.
- Malzeme Ayırma: Parçalama sonrası ortaya çıkan kırık malzeme akışı, manyetik ayırıcılarla ferromanyetik metaller (örneğin çelik), optik veya yoğunluk temelli ayırıcılarla diğer metaller, plastikler ve cam olarak sınıflandırılır.
- Malzeme Geri Kazanımı: Sınıflandırılan ferromanyetik metaller eritilerek yeni ürün üretimine girdi sağlar; diğer metaller ve malzemeler de uygun sektörlere gönderilerek hammadde olarak değerlendirilir (Australian National Laboratory Study on Shredder Processes; 2011) .



Kaynak <https://tinyurl.com/42mphbna>

Parçalama işlemi, geri dönüşüm sürecinin malzeme geri kazanım verimliliğini belirleyen ana unsur olarak kabul edilir. Bu aşama, ELV yönetimi araştırmalarında hem çevresel hem de ekonomik etkiler değerlendirilirken sıkça incelenir (Karagoz, 2020) .

Enerji Geri Kazanımı

Geri dönüştürülemeyen plastik ve kauçuk esaslı parçalar, kontrollü yakma sistemleriyle enerji geri kazanımına yönlendirilebilmektedir. Bu yöntem, düzenli depolama ihtiyacını azaltmaktadır.

motorlu taşıtlarda birçok parça plastik ve kauçuk esaslıdır:

- Plastik parçalar: Gövde panelleri, tamponlar, iç döşemeler, kablo izolasyonları, hava filtreleri ve yakıt sistemleri parçaları.
- Kauçuk parçalar: Lastikler, contalar, hortumlar ve süspansiyon bileşenleri.

Bu malzemeler, geri dönüşümü teknik olarak zor veya ekonomik olarak maliyetli olduğundan “geri dönüştürülemeyen atık” sınıfına girer (García-Gutiérrez et al., 2024).

Kontrollü Yakma ile Enerji Geri Kazanımı

Geri dönüştürülemeyen plastik ve kauçuk parçalar, kontrollü yakma sistemleri (Waste-to-Energy, WtE) ile enerji üretmek amacıyla kullanılabilir:

- Yakma süreci: Atıklar yüksek sıcaklıkta kontrollü bir fırında yakılır.
- Enerji geri kazanımı: Yanma sırasında açığa çıkan ısı, elektrik üretiminde veya ısıtma sistemlerinde kullanılabilir.
- Emisyon kontrolü: Modern tesislerde filtreler ve scrubber sistemleri sayesinde duman ve zararlı gaz emisyonları minimuma indirilir (Songül & Altay, 2025).

Bu yöntem, atığın hacmini %70–90 oranında azaltır, böylece düzenli depolama alanlarına gönderilecek miktar düşer.

Düzenli Depolama İhtiyacının Azalması

- Plastik ve kauçuk esaslı araç parçaları hacimli ve uzun ömürlü atıklardır, bu nedenle doğrudan depolanmaları halinde alan ihtiyacı ve çevresel riskler artar.
- Kontrollü yakma ile bu malzemeler enerjiye dönüştürüldüğünde:
 - Depolama alanı ihtiyacı azalır.
 - Atıkların neden olabileceği toprak, su ve hava kirliliği riski minimuma iner.
 - Geri kazanılan enerji, fosil yakıt tüketimini azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlar (Achi, 2024).

Avrupa Birliği ve Türkiye’de Mevzuat

Avrupa Birliği’nde ÖTA Yönetimi

Avrupa Birliği’nde ömrünü tamamlamış araçların yönetimi, 2000/53/EC sayılı Ömrünü Tamamlamış Araçlar Direktifi ile çerçevelenmiştir. Direktifin temel amaçları ve hükümleri şunlardır:

Üretici Sorumluluğu (Extended Producer Responsibility, EPR)

- Araç üreticileri, araçların ömrünü tamamladıktan sonra ortaya çıkan atıkların çevreye zarar vermeden bertaraf edilmesinden sorumludur.
- Üreticiler, geri dönüşüm ve yeniden kullanım süreçlerini organize etmek ve maliyetlerini üstlenmekle yükümlüdür (Directive 2000/53/EC, 2000).
- %95 Geri Kazanım ve Geri Dönüşüm Hedefleri
- Bu hedef, mekanik geri dönüşüm, yeniden kullanım ve enerji geri kazanımı gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir.

- Özellikle metallerin ve geri dönüştürülebilir plastiklerin ekonomik olarak geri kazanımı önceliklidir.
- Araçlarda bulunan kurşun, cıva, kadmiyum ve altı değerlikli krom gibi tehlikeli maddelerin kullanımını sınırlamayı hedefler.
- Bu yaklaşım, hem araç üretimi hem de bertaraf sürecinde çevresel risklerin azaltılmasını sağlar (Lindhqvist, 2000).

AB Direktifi çevre koruma, kaynak verimliliği ve döngüsel ekonomi ilkeleri çerçevesinde ÖTA yönetimini sistematik hale getirmektedir.

Türkiye’de ÖTA Yönetimi

Türkiye’de ömrünü tamamlamış araçlar, Atık Yönetimi Yönetmeliği ve Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Hakkında Yönetmelik kapsamında ele alınmaktadır:

- Atık Yönetimi Yönetmeliği
 - Tüm atık türleri için genel çerçeveyi belirler.
 - Araç atıkları, diğer tehlikeli ve tehlikesiz atıklarla birlikte bu yönetmelik kapsamında lisanslı tesislerde toplanır, depolanır ve geri kazanılır.
- Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Hakkında Yönetmelik
 - Türkiye’deki ÖTA yönetimini özel olarak düzenler.
 - Lisanslı geri dönüşüm ve söküm tesislerinin faaliyetlerini denetler.
 - Atık araçların güvenli sökümü, geri kazanımı ve bertarafını sağlar.

Tehlikeli maddelerin ayrıştırılması ve bertaraf edilmesini zorunlu kılar (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Türkiye’de uygulanan bu mevzuat, AB Direktifi ile benzer hedefler taşımakla birlikte, geri kazanım oranları ve denetim mekanizmaları açısından halen geliştirilme aşamasındadır. Özellikle kontrollü geri dönüşüm ve enerji geri kazanımı süreçleri ile AB standartlarına uyum çalışmaları sürdürülmektedir.

Karşılaştırmalı Değerlendirme

Avrupa Birliği’nde ÖTA yönetimi, 2000/53/EC sayılı Ömrünü Tamamlamış Araçlar Direktifi ile düzenlenmiştir. Direktif;

- Üretici sorumluluğu,
- %95 geri kazanım hedefi,
- Tehlikeli maddelerin azaltılması gibi hükümler içermektedir.

Türkiye’de ise ÖTA’lar, Atık Yönetimi Yönetmeliği ve Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Hakkında Yönetmelik kapsamında ele alınmaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2021).

Tablo1: Öta kıyaslaması Avrupa birliği ve Türkiye

Kriter	Avrupa Birliği	Türkiye
Yasal Dayanak	2000/53/EC ÖTA Direktifi	Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Hakkında Yönetmelik & Atık Yönetimi Yönetmeliği
Üretici Sorumluluğu	Zorunlu, finansal sorumluluk var	Kısmi, tesislerin sorumluluğu ağırlıklı
Geri Kazanım Hedefi	%95	Hedefler daha düşük, geliştirme aşamasında
Tehlikeli Madde Yönetimi	Katı sınırlamalar	Uygulama mevcut, denetim ve standartlar AB'ye göre daha esnek
Döngüsel Ekonomi Uyum	Yüksek	Artan uyum çabaları

ÖTA Yönetiminin Ekonomik Faydaları

Kayıt Dışı Ekonominin Azaltılması

Optimum ÖTA yönetimi, atık araçların formel (yasal) geri dönüşüm zincirine dahil edilmesini teşvik ederek kayıt dışı ekonomi ile mücadeleye katkı sağlar.

- Gayri resmi söküm ve hurda piyasaları yerine lisanslı geri dönüşüm tesislerinin kullanılması, ekonomik faaliyetlerin belirlenebilir ve denetlenebilir hâle gelmesine yardımcı olur.
- Bu süreç, devletin vergi gelirlerini artırırken, iş gücünün sosyal güvenlik kapsamına girmesine ve çalışma standartlarının yükselmesine imkân tanır. Bu tür yapıların oluşturulması, kayıt dışı ekonomik faaliyetleri azaltarak daha şeffaf ve sürdürülebilir ekonomi modellerine geçişi destekler .

İstihdamda Artış ve Sektörel Büyüme

ÖTA'ların sistematik olarak toplanması, ayrıştırılması, sökülmesi ve geri dönüştürülmesi, çok sayıda istihdam imkânı yaratır:

- Toplama, lojistik, söküm, metal ve plastik ayrıştırma tesisleri ile yeniden işleme gibi farklı adımlar, doğrudan iş gücü gerektirir.
- Ayrıca, yan sektörlerde (lojistik, ekipman tedariki, eğitim vb.) dolaylı istihdam yaratır. Geri dönüşüm sektöründe artan faaliyetler, hammadde işleme ve yeniden kullanım kapasitelerini artırarak ulusal ekonomide alışılmış üretim hatlarının dışına yeni iş alanları açar .

Hammadde İthalatının Azalması

Elektrikli ve klasik araçlar da dahil olmak üzere araçlardan elde edilen metaller (çelik, alüminyum, bakır), plastikler ve diğer geri kazanılabilir malzemeler, ikincil hammadde olarak üretim süreçlerine dönebilir.

- Bu durum, özellikle sanayi üretiminde yeni (birincil) hammadde ihtiyacını azaltır ve dolayısıyla ithalata olan bağımlılığı zayıflatır.
- Yerli geri kazanım ile ithal ham madde maliyetleri ve bunlara bağlı kur riski azaltılır; ülke döviz dengesi üzerinde olumlu etkiler yaratır. Bu özellik, döngüsel ekonomi modellerinin temel faydalarından biridir ve sürdürülebilir üretim hedefleri ile uyumludur .

Çevresel ve Toplumsal Kazanımlar

Çevresel Bilincin Artması: ÖTA yönetimi, toplumda çevresel farkındalığın yükselmesine önemli bir katkı sağlar. Araçların doğru şekilde sökülmesi, tehlikeli maddelerin ayrıştırılması ve geri kazanılması gibi süreçler, çevrenin korunmasına yönelik toplumsal bilgi düzeyini artırır.

Bu uygulamalar ile vatandaşlar, atığın yalnızca “çöp” olmadığını, aynı zamanda ekonomik değeri ve çevresel etkisi olan bir kaynak olduğunu öğrenecek şekilde eğitilir. Bu tür bilinç artışı, daha geniş uygulamalarda sürdürülebilir davranış modellerinin benimsenmesini teşvik eder .

Sürdürülebilir Toplum ve Döngüsel Ekonomiye Katkı

Optimum ÖTA yönetimi, döngüsel ekonomi yaklaşımlarının somut bir uygulama alanıdır. Bu yaklaşım, malzemelerin ekonomik sistem içinde tutulmasını ve atığın minimuma indirilmesini sağlar.

- Döngüsel ekonomi modeli, ürünlerin kullanım ömürlerinin uzatılması, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve malzeme geri kazanımı gibi unsurlarla kaynak verimliliğini artırır.
- Böylece sürdürülebilir toplum hedeflerine direkt katkı sağlanır; atık miktarı ve çevresel baskı azalırken üretim döngüsü daha etkin hâle gelir .

Sonuç ve Öneriler

Ömrünü tamamlamış araçların optimum düzeyde değerlendirilmesi, sürdürülebilir ulaşım ve döngüsel ekonomi hedeflerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Türkiye’de etkin bir ÖTA yönetimi için;

- Ulaşım sektörünün çevresel etkilerinin azaltılması, doğal kaynakların verimli kullanılması ve atık miktarının minimize edilmesi açısından ÖTA yönetimi kritik bir role sahiptir. Araçların kullanım ömrü sonunda ortaya çıkan metal, plastik, cam ve kauçuk gibi malzemelerin geri kazanılması; hem hammadde ihtiyacını azaltmakta hem

de çevresel kirliliğin önlenmesine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, ÖTA'ların yalnızca bir atık olarak değil, ekonomik değeri olan ikincil bir kaynak olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

- Ülkemizde etkin bir ÖTA yönetim sisteminin oluşturulabilmesi için öncelikle lisanslı sökülme ve geri dönüşüm tesislerinin yaygınlaştırılması büyük önem taşımaktadır. Lisanslı tesisler, araçların çevreye zarar vermeyecek şekilde sökülmesini, tehlikeli maddelerin güvenli biçimde bertaraf edilmesini ve geri dönüştürülebilir parçaların sistematik olarak ayrıştırılmasını sağlar. Bu tesislerin ülke genelinde dengeli bir şekilde dağıtılması, hem çevresel risklerin azaltılmasına hem de kayıt dışı faaliyetlerin önlenmesine katkı sunacaktır.
- Üretici sorumluluğu uygulamalarının güçlendirilmelidir. Genişletilmiş Üretici Sorumluluğu (EPR) yaklaşımı kapsamında araç üreticilerinin, ürünlerinin yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerinden sorumlu tutulması hedeflenmektedir. Bu sistem sayesinde üreticiler, geri dönüşümü kolay malzeme kullanımı, modüler tasarım ve çevre dostu üretim teknikleri gibi uygulamalara yönlendirilmektedir. Ayrıca, üreticilerin ÖTA toplama ve geri kazanım süreçlerine finansal ve organizasyonel katkı sağlaması, sistemin sürdürülebilirliğini artırmaktadır.
- Dijital araç takip ve hurda yönetim sistemlerinin geliştirilmesi ÖTA yönetiminde şeffaflık ve verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Dijital sistemler sayesinde araçların trafikten çekilme süreci, hurdaya ayrılması, sökülme ve geri dönüşüm aşamaları elektronik ortamda izlenebilmektedir. Bu uygulama, hem usulsüz işlemlerin önüne geçilmesini hem de veri temelli politika geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, vatandaşların sürece daha kolay erişebilmesi ve bilgilendirilmesi, çevresel bilincin artmasına katkı sağlamaktadır.
- Sonuç olarak, Türkiye'de ÖTA yönetiminin güçlendirilmesi; çevresel sürdürülebilirlik, ekonomik verimlilik ve toplumsal bilinç açısından önemli kazanımlar sunmaktadır. Lisanslı tesislerin yaygınlaştırılması, üretici sorumluluğunun artırılması ve dijital yönetim sistemlerinin etkin kullanımı, ülkenin döngüsel ekonomi hedeflerine ulaşmasında kilit rol oynayacaktır.
- Yasal mevzuata ek olarak belirli bir yaşa gelen aracın, sahibinin tercihi olarak yasal düzenleme bklemeden aracını trafikten çekebilmelidir. Bu durumda olan araç sahipleri ekonomik açıdan desteklenmeli, ÖTV indirimi uygulanabilmelidir.

KAYNAKLAR

Achi, C. G. (2024). *A review on pathway to sustainable energy recovery in automotive plastic and rubber waste*. NEPT Journal.

Anadolu Ajansı. (2026, 16 Ocak). *TÜİK: Trafiğe kayıtlı toplam taşıt sayısı 33 milyon 612 bin 650 oldu*. <https://www.aa.com.tr>

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2009). *Ömrünü tamamlamış araçların kontrolü hakkında yönetmelik*. Resmî Gazete.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Atık yönetimi ve ömrünü tamamlamış araçlar mevzuatı*. Ankara.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2021). *Ömrünü tamamlamış araçların kontrolü hakkında yönetmelik* (Sayı: 31551). Resmî Gazete. <https://www.resmigazete.gov.tr>

Demir, M., & Aydın, E. (2021). Otomotiv sektöründe geri dönüşüm uygulamaları ve çevresel etkiler. *Çevre Bilimleri Dergisi*, 9(2), 115–130.

Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of-life vehicles. (2000). *Official Journal of the European Communities*, L269, 34–43. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0053>

Ekonomim. (2026). *Trafiğe kayıtlı toplam taşıt sayısı 33 milyon 612 bin 650 oldu*. <https://www.ekonomim.com>

European Commission. (2000). *Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles*. Official Journal of the European Union.

European Parliament & Council. (2000). *Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles*. Official Journal of the European Union.

Eurostat. (2022). *Recycling rates of end-of-life vehicles in the EU*. <https://ec.europa.eu/eurostat>

García Gutiérrez, P., Amadei, A. M., Klenert, D., Nessi, S., Tonini, D., & Tosches, D. (2024). Environmental and economic assessment of plastic waste recycling and energy recovery pathways in the EU. *Resources, Conservation and Recycling*, 215, 108099. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108099>

Kılıç, O., & Yılmaz, S. (2018). Motorlu taşıtların ekonomik ömrü ve sürdürülebilirlik. *Ulaşım ve Lojistik Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 45–58.

Lindhqvist, T. (2000). *Extended producer responsibility in cleaner production: Policy principle to promote environmental improvements of product systems*. International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University.

Özdemir, A., & Demirel, Y. (2018). Ömrünü tamamlamış araçların çevresel etkileri ve geri dönüşüm uygulamaları. *Journal of Environmental Engineering*, 6(2), 45–58.

Songül, E. E., & Altay, M. C. (2025). Plastik atıkların pirolizle katma değerli ürünlere dönüştürülmesi: Döngüsel ekonomi yaklaşımı. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(1), 81–89.

<https://doi.org/10.21831/ejeas.v8i1.1716406>

The Istanbul Post. (2024). *Around 2.3M road motor vehicles registered last year in Türkiye*. <https://www.theistanbulpost.com>

TÜİK. (2025). *Motorlu kara taşıtları, Aralık 2025*. Türkiye İstatistik Kurumu. <https://www.tuik.gov.tr>

Work'n Women. (2025). *Automobile registrations increased in November 2025*. <https://www.worknwomen.com>

