

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALTERNATİF YAKITLARIN BENZİNLİ MOTOR EMİSYONLARI ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ

BÜLENT SERDAR ULUSOY

TEMMUZ 2005

Fen Bilimleri Enstitü Müdürünün onayı.

Prof. Dr. Yakup ARICA



Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak **Makine** Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Veli ÇELİK

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumuzu ve Yüksek Lisans tezi olarak bütün gerekliliklerini yerine getirdiğini onaylarız.

Doç. Dr. Ersan ASLAN

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Ersan ASLAN

Prof. Dr. Veli ÇELİK

Yrd. Doç. Dr. Sadettin ORHAN

ÖZET

ALTERNATİF YAKITLARIN BENZİNLİ MOTOR EMİSYONLARI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ULUSOY, Bülent Serdar

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Ersan ASLAN

Temmuz 2005, 85 sayfa

Dünya petrol rezervlerinin hızla tükenmesi ve atmosfere bırakılan egzoz emisyon gazlarına ait sınır değerlerin uluslar arası antlaşmalar ve çevre yönetmelikleri ile aşağılara çekilmesi sebebi ile, otomotiv imalatçıları sürekli bir baskı altındadır. Bu nedenle günümüzde otomotiv sektörü ve bilim adamları alternatif yakıt kullanımı üzerine çalışmalarını hızlandırmışlardır.

Alternatif yakıtlar ile ilgili çalışmaların daha da hız kazandığı günümüzde, farklı alternatif yakıtların optimum performans ve emisyon değerlerini sağlayacak şekilde kullanımı bu neden ile çok önemlidir.

Bu çalışmada; benzine alternatif olarak kullanılabilen LPG, CNG ve hidrojen alternatif yakıtlarının yanma özellikleri ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir.

Her bir alternatif yakıtın CO, HC, NO_x emisyonları benzin kullanılması halinde oluşan değerler ile karşılaştırılmalı olarak verilmiş ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alternatif yakıt, LPG, CNG, Hidrojen, Emisyon,

ABSTRACT

A STUDY ABOUT THE EFFECTS OF USE OF ALTERNATIVE FUELS TO ENGINES EMISSIONS

ULUSOY, Bülent Serdar

Kırıkkale University

Graduate School Of Natural and Applied Sciences

Department of Machine, M. Sc. Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Ersan ASLAN

July 2005, 85 pages

Automotive manufacturers are under permanent pressure as a result of ever decreasing world oil reserves, and policies and measures, which limit or reduce exhaust emissions. Hence, scientists and automotive manufacturers have accelerated their studies about alternative fuels.

Use of alternative fuels which can provide the highest efficiency and the best emission possible is more important today than it has ever been because of the pace of this race over alternative fuels.

This paper deals with the improvements in exhaust emissions and nature itself overall by the use of liquefied petroleum gas (LPG), compressed natural gas (CNG) and hydrogen as alternative fuels. Emissions of each alternative fuel, such as

CO, HC and NO_x that compared with conditions due to gasoline use are given and evaluated.

Key Words: Alternative fuels, LPG, CNG, Hydrogen, Emission

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında her türlü yardımını esirgemeyen tez yöneticim Doç. Dr. Ersan ASLAN'a çalışmalarım esnasında, daima yardımını gördüğüm Prof. Dr. Veli ÇELİK'e, her konuda bana destek olan arkadaşım Kadir GÜNDOĞAN'a ve Hanifi BELGE'ye, son olarak bana her konuda olduğu gibi, tezimi hazırlamam esnasında da yardımlarını esirgemeyen Aileme teşekkür ederim.

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

λ	:	Hava fazlalık katsayısı
Φ	:	Yakıt fazlalık katsayısı (Ekivalans Oranı)
M_k	:	Karışımın mol ağırlığı
M_y	:	Yakıtın mol ağırlığı
Omin	:	Yanma için gerekli minimum oksijen miktarı

KISALTMALAR

CNG	:	Sıkıştırılmış doğalgaz
DTK	:	Doğrudan Tehlike Konsantrasyonu
HFK	:	Hava Fazlalık Katsayısı
KVS	:	Kısa Vade Sınır Değerleri
LPG	:	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MAK	:	Maksimum Atmosfer Konsantrasyonu
MİK	:	Maksimum İşyeri Konsantrasyonu
PM	:	Partikül Madde

SULEV	:	Süper Ultra Düşük Emisyonlu Taşıt
ULEV	:	Ultra Düşük Emisyonlu Taşıt
UVS	:	Uzun Vadeli Sınır Değerleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

2.1. Motorlu taşıtlarda üretilen kirletici maddelerin yapısal kaynakları.....	12
2.2. Piston-biyel mekanizmasına ve yanma odası şekline ait büyüklükler.....	14
2.3. ADAC tarafından 1995 yılında 1 - 6 yaş arasında 1294158 adet taşıtta karşılaşılan arızaların dağılımı.....	19
2.4. Ateşleme bujileri elektrot aralığı θ (teta), ateşleme avansı açısı ϕ (fi.) ve kesici uçları aralığının (platin açıklığı) Δ (Delta) egzoz kirletici gazları ve yakıt tüketimine etkileri.....	21
2.5. Karbüratörün ana yakıt düzeneği yakıt memesi debisinin (Q) ve boşta çalışmadaki CO miktarının egzoz kirletici gazları ve yakıt tüketimine etkisi (rölanti en düşük düzgün çalışma devir sayısında ayarlanmıştır).....	22
2.6. Benzin motorlarında ateşleme avansının ($\Phi_{ateş}$) motor gücü (N_e), özgül yakıt tüketimi (b_e) ve egzoz emisyonlarına etkisi.....	25
2.7. Kapalı (pozitif) karter havalandırma sistemi.....	29
2.8. Kapalı depo havalandırma sistemi.....	31
2.9. Egzoz gazı içindeki CO ve HC ların yüksek sıcaklıkta okside olmasını sağlayan termik (ısı) reaktör.....	32
2.10. Katalitik konvertörün işlevi.....	33
2.11. Katalitik konvertörün iç yapısı.....	34
2.12. a) Egzoz emisyonlarının katalizator öncesi hava fazlalık katsayısına göre değişimi. b) Hava fazlalık katsayısının katalizatorün dönüşüm verimine etkisi.....	36

2.13. Elektronik kontrol ünitesi, üç yollu katalitik konvertörlü, lamda vericili ve benzin püskürtme sistemli bir motorun basilleştirilmiş prensip şeması.....	37
2.14. Havadaki CO konsantrasyonunun ve solunum suresinin insan sağlığı üzerindeki etkisi	43
2.15. Benzin motorlarında HFK'nın egzozdaki kirletici konsantrasyonlarına etkisi	50
2.16. Araç yakıtlarının yüzde kirletici miktarı	58
2.17. Katalizörlü araçlarda benzin ve LPG'nin emisyon değerleri	60
2.18. Partikül emisyonlarının kat edilen mesafeye göre değişimi.....	62
2.19. Farklı yükleme koşullarında oluşan partikül boyutu dağılımı.....	63
2.20. NO emisyonları	65
2.21. Otomobillere bağlı temel enerji kullanımı ve toplam sistem emisyonları.....	67
3.1. Benzin ve LPG için CO kıyaslaması	71
3.2. Benzin ve LPG için HC kıyaslaması	72
3.3. Benzin ve LPG için HC kıyaslaması	73
3.4. CNG ve Benzin için CO kıyaslaması	75
3.5. CNG ve Benzin için CO ₂ kıyaslaması	76
3.6. CNG ve Benzin için HC kıyaslaması	77
3.7. Sıkıştırma ve Ekiyalans oranlarının NO _x emisyonuna etkisi	78
3.8. Sıkıştırma oranı ve motor hızının NO _x emisyonuna etkisi	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

2.1. Hava kirleticileri Sınır değerleri	8
2.2. Zararlı Maddelerin Tehlike Sınırları	42
2.3. Dizel motoru egzoz gazlarındaki partiküllerin bileşimi	47
2.4. 68 kg ağırlığında ve akciğeri yaklaşık 150 m ² yüzeye sahip olan bir insanın hava gereksinimi	51
2.5. Kuru havanın elemansel analizi	53
2.6. Egzoz emisyon kirleticilerinin CO 'ya göre gerçek zarar verme değerleri ...	59
2.7. Otomobillere bağlı temel enerji kullanımı ve toplam sistem emisyonları.....	68
3.1. Deney motorlarının ana özellikleri.....	70

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
İÇİNDEKİLER	xi
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	6
2.1. Hava Kirliliği ve Nedenleri	6
2.1.1. Hava Kirleticileri	8
2.1.2. Hava Kirliliği Kaynakları	10
2.1.3. Hava Kirliliği	11
2.1.4. Motorlu taşıtlarda kirletici maddelerin oluşumu ve taşıtların hava kirlenmesine etkileri	11
2.1.4.1. Motorlu Taşıtlarda Kirletici Kaynakları.....	11
2.1.4.2. Motorun Yapısal Özelliklerinin Emisyona Etkisi.....	13
2.1.4.3. Taşıtların Motorunun Bakım ve Ayarının Egzoz Emisyonlarına Etkisi.....	18
2.1.4.4. Ateşleme sistemi.....	19

2.1.4.5. Benzin Motorlarında Bakım ve Ayarın Egzoz Emisyonlarına Etkisi.....	22
2.1.5. Motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticilere karşı alınan önlemler.....	28
2.1.5.1. Benzin Motorlu Taşıtlarda Alınan Önlemler.....	28
2.1.6. Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Hava Kirliliği ve Önlenmesine Yönelik Tedbirler	38
2.1.7. Kirleticiler İçin Ölçü Birimleri	40
2.1.8. Kirletici Maddelerin İnsan ve Çevre Sağlığı Üzerindeki Etkileri ...	41
2.1.9. Havanın Yapısı ve İnsanın Hava Gereksinimi	50
2.2. Stokiyometrik Oran ve Yanma	52
2.2.1. Hava ile Yanma	52
2.3. Benzin ve Benzinli Araçlarda Kullanılan Alternatif Yakıtların Emisyon Üzerine Etkileri	55
2.3.1. Benzinden kaynaklanan emisyonlar	56
2.3.2. LPG'den kaynaklanan emisyonlar	57
2.3.3. CNG'den kaynaklanan emisyonlar	61
2.3.4. Hidrojenden kaynaklanan emisyonlar	64
2.3.5. Yakıt pillerinden kaynaklanan emisyonlar.....	66
3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	69
3.1. LPG Kullanılan Araçlardaki Emisyon Bulguları	69
3.2. CNG Kullanılan Araçlardaki Emisyon Bulguları	74
3.3. Hidrojen Kullanılan Araçlardaki Emisyon Bulguları	77
4. SONUÇLAR	80
KAYNAKLAR	83

1. GİRİŞ

Sanayi ve teknolojideki gelişmeler, sayılan her gün biraz daha artan endüstriyel kuruluşlar ve motorlu taşıtlar bir yandan insan yaşamını kolaylaştırırken, diğer yandan çevre kirliliğini de beraberinde getirmektedir. Kentsel hava kirliliğinin başlıca kaynakları buji ateşlemeli ve dizel motorlarıdır, yani içten yanmalı motorlardır^(1,2).

Bugün içten yanmalı motorlu araçları hava kalitesini dikkate alarak dizayn etmek zorunluluğu vardır. Şehirlerdeki hava kalitesinin artışı, çeşitli kaynaklara uygulanan emisyon kontrol teknolojilerinde önemli gelişmelerle olmaktadır. Örneğin, bugün yeni model bir otomobil emisyon kontrolü olmayan bir otomobile oranla %95 daha az HC ve CO yaymakta ve yaklaşık %90 daha az NO yaymaktadır⁽³⁾.

Fosil kökenli yakıtların birincil enerji kaynağı olarak kullanılması sonucunda, CO₂ emisyonu değerleri artmaktadır, CO₂ sera gazları içerisindeki en önemli gazdır. Sera gazlarının emisyon değerleri çok büyük bir problem oluşturmaktadır Çünkü sıcaklık yükselmesi ile sera gazlarının konsantrasyonları artmaktadır. Bu artış atmosferde oluşabilecek olası iklim değişikliklerini etkileyebilir. Sera gazlarının indirgeme ile ilgili protokoller Kyoto protokolü ile belirlenmiştir. Sera gazlarının oluşmasındaki katkısı en fazla olan sektör karayolu ulaşımıdır. Hesaplamalara göre CO₂ emisyonunun % 30'luk bir kısmı OECD ülkelerindeki fosil kökenli yakıt kullanımı sonucu oluşmaktadır⁽⁴⁾.

Dünyadaki petrol rezervleri aşırı kullanım sonucu tükenmektedir. Buna bağlı olarak artan hava kirliliği hızla artmaktadır. Yakıt tüketimine bağlı olarak egzoz

emisyonlarının artması, araştırmacıları çevreye zarar vermeyen alternatif yakıt arayışlarına yöneltmişlerdir ⁽⁵⁾. Günümüzde, büyük şehirlerde artan hava kirliliği, tüm gelişmiş ülkelerin önemli sorunlarından birisi durumuna gelmiştir. Bu kirlenmede, şehir içi ulaşımda kullanılan taşıtların çıkardıkları zararlı egzoz emisyonlarının önemli bir payı bulunmakta, bu yüzden bir çok ülkede temiz ulaşım sağlanması için yaygın destek programları uygulanmakta, daha temiz yanan alternatif yakıt arayışları sürdürölmektedir.

Buji ateşlemeli motorlarda hidrokarbon ve diğer kirletici emisyonları azaltma çabaları, kanuni zorlamalardan ötürü otomobil şirketlerinin ve üniversitelerin bilimsel araştırmalarının önemli bir araştırma konusu olmuştur. Hızlı ilerlemeler kaydedilerek emisyon seviyelerinde ciddi azalmalar sağlanmıştır. Bunun için yapılan bir çok çalışmada HC emisyonlarına oluşum teşkil eden mekanizmalar belirlenmiştir ^(6,7,2,8,9). Bu mekanizmaların karmaşık fiziğini anlayıp geliştirmede ise iki yaklaşım kullanılmıştır. Birincisi deneysel çalışmalar, ikincisi bilgisayar modellemeleridir. Birçok kabuller sonucunda elde edilen denklemlerden oluşan bilgisayar modelleri ise ilginç sonuçlara ve gelecekteki araştırmalara öncülük etmektedirler.

Hidrokarbonlar veya daha uygun ifadeyle organik emisyonlar yakıtın ya eksik yanması ya da direkt dışarı atılması sonucunda oluşan ürünlerdir. Bu ürünlerin yaklaşık yarısını oksijenle hiç reaksiyona girmeyen çiğ yakıt, diğer yarısını ise yakıtın oksijenle kısmi reaksiyonu sonucu oluşan bileşenler oluşturur. Bunlar etan, eten, propan, metan, formaldehid, benzen, izobütan, tolüen, ve 1.3 bütan gibi ürünlerdir. Bunların bir çoğu insan sağlığına zararlı etkilere sahiptir ⁽⁶⁾.

Silindir içine alınan yakıtın bir kısmı alevin normal yayılma süreci esnasında hidrokarbon oluşum kaynakları tarafından saklanırlar. Yani yanma olayına iştirak

etmezler. Bu yanmamış hidrokarbonların bir kısmı sonraki yanma işleminde silindir içinde oksitlenirler. Oksitlenmeyip silindir içinde kalan hidrokarbonların bir kısmı silindiri terk ederler. Silindiri terk edemeyenler ise artık gazlarla birlikte silindir içinde kalarak bir sonraki taze karışım (yakıt+hava) ile karışırlar ve o çevrimin yanma olayına ve hidrokarbon emisyon işlemlerine katılırlar. Silindiri terk edebilenlerin bir kısmı egzoz manifoldunda oksitlenirler. Oksitlenmeyenler egzoz manifoldundan sonra ölçülen emisyonlar olup "motor çıkış hidrokarbon emisyonları" olarak isimlendirilirler. Motoru terkeden hidrokarbonlar daha sonra katalitik konvertöre girerler. Emisyon kontrol sisteminin son derece önemli bir elemanı olan katalitik konvertör, motor çıkış hidrokarbon emisyonlarının yaklaşık %90'nını veya daha fazlasını zararsız bileşenlere dönüştürür.

Normal yanma işlemi sonucu açığa çıkan yanmamış hidrokarbonların sıcak silindir gazları ile karışım oranı, karışımın yanması sonucu oluşan gaz sıcaklığı ve yapısı ve bunu takip eden sıcaklık-zaman ve kompozisyon-zaman ilişkisi karışımın seyriyi belirleyerek silindir içi oksidasyon miktarını tayin eder. Egzoz manifoldundaki oksidasyon ise gazın kompozisyonuna, sıcaklığına ve hidrokarbonun oluşan ortamda tutulma zamanına bağlıdır. Hidrokarbonlar yanma odası içinde zamanla değişen üniform olmayan bir dağılıma sahiptirler. Daha çok yanma odası cidarlarına yakın toplanırlar.

Yukarıda izah edilen bu mekanizmalar ayrıca büyük bir performans kaybına da sebep olurlar. Yanma olayına katılmayarak motordan üretilecek olan işi azalttıklarından dolayı yanma verimini düşürürler ve genelde tahmin dilenden daha büyük bir öneme sahiptirler.

Son yıllarda artış gösteren taşıt sayısına paralel olarak özellikle şehirlerde etkin hale gelen hava kirliliği sorununa çözüm getirmek için de konvansiyonel yakıtlara göre daha az kirletici emisyon üreten yakıtlarında içten yanmalı motorlarda kullanımı amaçlanmaktadır. Büyük şehirlerde oluşan toplam hava kirliliğinin % 50-60'ını taşıtlardan yayılan egzoz emisyonlarının oluşturduğu bilinmektedir.

Çeşitli ülkelerde yürürlüğe konan emisyon standartları egzoz emisyonu bakımından oldukça düşük limitler öngörmektedir. Kirletici egzoz gazları emisyonlarının azaltılması amacıyla benzin ve diesel motorlarının geliştirilmesine ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Ancak yakıt özelliklerinin emisyonlar ve yakıt tüketimi üzerindeki etkisi de büyüktür. Ağır hizmet taşıtlarında kullanılan diesel motorlarının giderek daraltılan emisyon standartlarını sağlamada karşılaştığı zorluklar özellikle bu motorlarda gaz yakıtların kullanımını cazip hale getirmektedir.

Hidrojenin mükemmel bir ateşleme sağlaması ve daha uygun bir adyabatik alev sıcaklığına ulaşmasından dolayı, hidrojen ile çalışan motorlar, ateşleme avansı, daha iyi bir alev profili, hızlı yanma ve ateşleme açısı bakımından dizel ve benzinli motorlara göre daha iyi değerler vermektedir⁽¹⁰⁾.

İçten yanmalı motorlarda konvansiyonel yakıtlara alternatif olarak alkol (etanol, metanol) doğal gaz ve hidrojen gibi alternatif yakıtların kullanımı düşünülmektedir. Özellikle yüksek oktan sayısı nedeniyle alkoller benzin motorları için elverişli yakıt kabul edilmiştir. Ancak alkollerin üretiminin kısıtlı olması ve enerji yoğunluğunun düşük olması nedeniyle kullanım ve depolanmasında ortaya çıkan sorunlar sonucu yaygın olarak kullanımı mümkün olmamıştır.

Bu çalışmada; benzine alternatif olarak kullanılabilen LPG, CNG ve hidrojen alternatif yakıtlarının yanma özellikleri ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Her bir alternatif yakıtın CO, HC, NO_x emisyonları benzin kullanılması halinde oluşan değerler ile karşılaştırmalı olarak verilmiş ve değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Ulaşım olanaklarındaki gelişmelere bağlı olarak insanların yaşam düzeyleri yükselirken dünyanın sahip olduğu kaynakların hızlı bir şekilde tüketilmesi ve çevreye yayılan çok yüksek orandaki kirleticiler büyük bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. Dünya nüfusunun artışı ve trafiğe çıkan yeni araç sayısının gün geçtikçe artmasına bağlı olarak, kişi başına düşen enerji miktarındaki artış, son yıllarda çevre kirliliği açısından önemli sorunlar ortaya çıkarmaya başlamıştır.

Bu çalışmada, hava kirliliği ile ilgili temel tanımlamalar, motorlu taşıtların hava kirliliğine etkileri ve alternatif yakıt olarak kullanılan LPG, CNG ve hidrojenin bu bölümde incelenmiştir.

2.1. Hava Kirliliği ve Nedenleri

Hava kirlenmesi havanın doğal bileşiminin çeşitli nedenlerle değişmesi olarak tanımlanabilir. Kirletici maddelerin havaya karışması ile ortaya çıkan bu olayda;

- I. Bir kaynak,
- II. Bir taşıyıcı ortam (burada alt atmosfer),
- III. Bir alıcı ortam bulunur.

Hava kirliliği; havada katı, sıvı ve gaz şeklindeki yabancı maddelerin insan sağlığına, canlı hayatına ve ekolojik dengeye zararlı olabilecek derişim ve sürede bulunmasıdır. Bu tanımda dikkati çeken önemli nokta "zararlı olabilecek" ifadesidir. Bu ifade zarar kavramının hava kirlenmesinde yeterli açıklıkta ve kesin olarak belirlenememesinin bir sonucudur. Hava kirliliğinin etki şekli ve derecesi yaş,

dayanıklılık gibi kişisel faktörlere bağlıdır. Tanımda kullanılan diğer önemli terim ise süredir. Hava kirlenmesinde kirleticilere maruz kalma süresi oldukça büyük önem taşımaktadır. Bazı kirleticiler düşük derişimlerde çok uzun sürede olumsuz etki yaparken diğer bazı kirleticilerin düşük derişimleri uzun sürede insanlarda ölümcül sonuç doğurmaktadır.

Alıcı için hava kalitesinin ne olması gerektiği "hava kalitesi" kriterleri denilen listeler yardımıyla ortaya konur. Kriterlerin yasal hale gelmiş şekli ise standartları oluşturur. Genellikle hava kalitesi sınır değerleri, uzun vadeli ve kısa vadeli sınır değerler olmak üzere iki şekilde tanımlanmıştır.

Uzun Vadeli Sınır Değer (UVS): Hava kirleticilerin düşük miktarlarının uzun sürede solunmasıyla ortaya çıkan kronik etkiler için verilen üst sınır değerleri gösterir.

Kısa Vadeli Sınır Değer (KVS): Kısa sürede hava kirleticilerin yüksek derişimlerinin solunmasıyla ortaya çıkan kısa süreli akut etkiler için belirtilen sınır değerlerdir. Çizelge 2.1'de Hava Kalitesi Sınır Değerleri verilmiştir⁽¹¹⁾.

Çizelge 2.1. Hava kirleticileri Sınır değerleri⁽¹¹⁾

Hava Kirleticileri	Birim	UVS (*)	KVS (**)
1. Kükürt dioksit(SO₂) Kükürt dioksit(SO₃) Dahil			
a.Genel	µg/m ³	150	400 (900)
b. Endüstri Bölgeleri	µg/m ³	250	400 (900)
2.Karbon monoksit(CO)	µg/m ³	10000	30000
3.Azot Dioksit (NO₂)	µg/m ³	100	300
4 Azot Monoksit(NO)	µg/m ³	200	600
5.Klor(Cl)	µg/m ³	100	300
6.Klorlu Hidrojen(HCl) ve Gaz halde anorganik klorürler	µg/m ³	100	300
7.Flörü Hidrojen(HF) ve Gaz halde anorganik klorürler	µg/m ³	-	10 (30)
8.Ozon(O₃) Fotokimyasal Oksitleyiciler	µg/m ³	-	(240)
9.Hidrokarbonlar(HC)	µg/m ³	-	140 (280)
10.Hidrojen Sülfür(HS)	µg/m ³		40 (100)
11.Havada asılı partikül maddeler(PM) 10 µ dan daha küçük partiküller			
a. Genel	µg/m ³	150	300
b. Endüstri Bölgeleri	µg/m ³	200	400
12. PM içinde Kurşun (Pb) ve bileşikleri	µg/m ³	2	-
13.PM içinde Kadmiyum (Cd) ve bileşikleri	µg/m ³	0,04	-
14.Çöken tozlar (10 µ dan büyük partiküller dahil)	µg/m ² gün		
a-Genel		350	650
b- Endüstri Bölgeleri		450	800
15.Çöken tozlarda Kurşun ve bileşikleri	µg/m ² gün	500	-
16. Çöken tozlarda Kadmiyum ve bileşikleri	µg/m ² gün	7,5	-
17. Çöken tozlarda Talyum ve bileşikleri	µg/m ² gün	10	-

(*) UVS Uzun vadeli sınır değerleri

(**) KVS Kısa vadeli sınır değerleri

2.1.1. Hava Kirleticileri

Yer kabuğuna yakın atmosfer katında (traposfer) doğal ve yapay fiziksel, kimyasal ve biyolojik reaksiyonlardan kaynaklanan nem ve karbondioksitin yanı sıra daha çok insan etkinlikleri ile ilişkili olan kükürt dioksitler, karbon monoksit, azot oksitleri, ozon, hidrokarbon buharları ve süspanse katı veya sıvı damlacıkları da yer alır. Bu maddelerin havadaki miktarları azot ve oksijen gibi sabit olmayıp zaman ve mekan içinde değişkendir. Havada yalnızca milyonda bir kısım mertebesinde bulunan bu gazlar, sıvı veya katı maddeler buldukları yerdeki koşullara bağlı olarak hava kirlenmesine neden olurlar. Atmosferde gazların dışında sıvı veya katı taneciklerin gaz ortamında askıda (suspended) durmasıyla oluşan partiküller bulunmaktadır. Hava kirleticileri kısaca; havanın doğal bileşimini değiştiren gaz, sıvı veya katı haldeki kimyasal maddelerdir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir.

- Partiküller,
- Kükürtlü maddeler,
- Organik maddeler,
- Azotlu maddeleri,
- Karbon dioksit,
- Karbon monoksit,
- Halojenler,
- Radyoaktif maddeler.

Yukarıda sıralanan kirletici maddelerin bazıları doğrudan doğruya kirletici kaynaktan atıldıkları şekilde hava içinde bulunurlar. Birincil kirlenmeyi oluşturan bu kirleticiler birincil kirleticiler olarak adlandırılır. Bu gazlar atmosferde bulunan oksitleyici ozon maddesiyle ve fotokimyasal tepkimelerle daha ileri oksitlenme

seviyelerine yükseltgenebilirler. Böylece oluşan ara maddeler atmosferdeki su buharı ile birlikte sülfürik asit, nitrik asit, karbonik asit gibi doğaya zarar veren ürünleri oluşturarak asit yağmurlarına neden olurlar. Bu oluşuma İkincil Kirlenme denir.

2.1.2. Hava Kirliliği Kaynakları

Hava Kirliliği kaynaklarını doğal ve yapay kaynaklar olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür.

- **Doğal Kaynaklar**

Volkan faaliyetleri, orman yangınları açık arazide hayvan ve bitki ölümlerinin bozunmasını kapsar.

- **Yapay Kaynaklar**

Hammaddeleri, insanların kullanımına sunabilmek için gereken süreçler sonucunda oluşurlar. Yapay kaynaklar ‘‘Sabit Kaynaklar’’ve ‘‘Hareketli Kaynaklar’’olmak üzere ikiye ayrılır.

i. Sabit Kaynaklar: Katı, sıvı, gaz yakıtların yakılması ile veya herhangi bir üretim prosesi esnasında oluşan kirleticilerin bir baca yoluyla atmosfere emisyonun yayıldığı kaynakları içermektedir.

ii. Hareketli Kaynaklar: Kara, deniz, hava taşıtlarının egzozlarıdır. Kara, deniz ve hava taşıtlarında mazot, benzin veya jet yakıtı gibi yakıtlar tüketilmekte ve taşıtların egzozlarından atmosfere verilen hava kirleticileri, katı, sıvı ve gaz yakıtların yakılmasıyla oluşan yanma ürünlerinin benzerleridir.

2.1.3. Hava Kirliliği

Hava kirlenmesi genel anlamda, sanayi kuruluşlarında meydana gelen emisyonların yeteri kadar önlem alınmadan atmosfere bırakılması, ulaşım araçlarından kaynaklanan egzoz gazlarının atmosfere verilmesi, çeşitli tesislerde ve konutlarda kullanılan özellikle fosil yakıtlardan ortaya çıkan partikül, duman, is, kükürt, azot oksitler ve hidrokarbonlardan oluşmaktadır.

2.1.4. Motorlu taşıtlarda kirlетici maddelerin oluşumu ve taşıtların hava kirlenmesine etkileri

2.1.4.1. Motorlu Taşıtlarda Kirlетici Kaynakları

Motorlu taşıtlarda üretilen kirlетici maddelerin başlıca dört yapısal kaynağı vardır.

- **Karter havalandırması:**

Yanma odasında yanma sonucu oluşan gazlar segman ile silindir arasından kartere geçmekte ve daha sonra buradaki yağ buharı ile birlikte atmosfere atılmaktadır. Karterden atmosfere atılan kirlетiciler ağırlıklı olarak HC'lerden oluşmaktadır. Karter havalandırması toplam motor emisyonunun yaklaşık % 20 sini oluşturmaktadır.

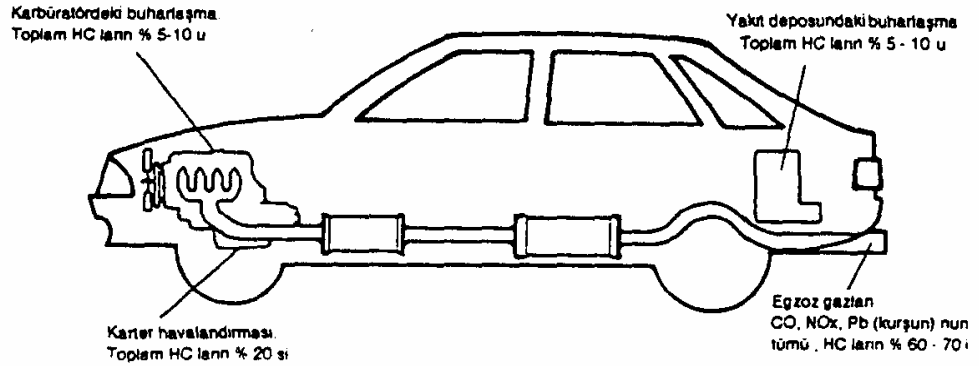
- **Yakıt deposu havalandırması:**

Özellikle sıcak havalarda yakıtın kolay buharlaşan bileşenleri, taşıt dururken veya hareket halindeyken (ayrıca dolum sırasında) atmosfere yayılmaktadır. Yakıt deposu havalandırmasından atmosfere atılan kirlетici maddeler tamamen HC'lar dan oluşmaktadır. Taşıtların toplam HC emisyonunun yaklaşık % 5 – 10 kadarı yakıt

deposundandır. Motorin içindeki uçucu bileşen miktarının benzine göre çok daha az olması nedeniyle, dizel motorlarında yakıt havalandırmasından olan HC emisyonu çok daha düşüktür.

- **Karbüratör:**

Yakıt deposu havalandırmasında olduğu gibi hava sıcaklığı ile karbüratörden olan kaçak buharlaşma kayıpları artmaktadır. Özellikle durup kalkma şeklindeki işletme şartlarında buharlaşma artar Karbüratördeki emisyon tamamen HC'dan oluşur. Püskürtmeli benzin motorlarında ve dizel motorlarda bu emisyon oluşmaz. Motordan olan toplam HC emisyonunun yaklaşık % 5 – 10 kadarı karbüratördendir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 – Motorlu taşıtlarda üretilen kirletici maddelerin yapısal kaynakları⁽¹²⁾.

2.1.4.2. Motorun Yapısal Özelliklerinin Emisyona Etkisi

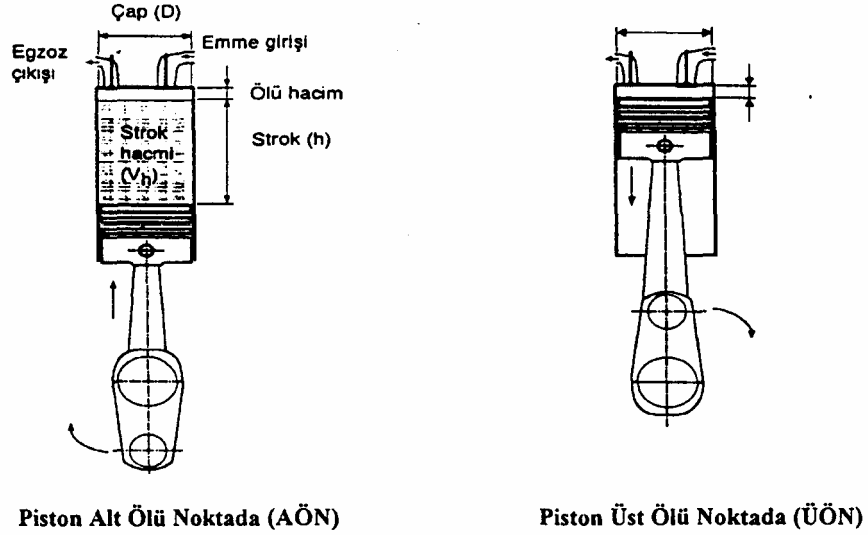
Benzin ve dizel motorlarında, motor tasarımına ilişkin çeşitli parametrelerin değişimi de egzoz gazları içerisindeki HC, CO, NO ve is miktarlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

- **Yanma odası şekli ve yüzey/hacim oranı:**

Yanma odası, piston silindir içinde en üst konuma (üst ölü nokta, ÜÖN) geldiği zaman, piston ile silindir kafası arasında kalan kısım olup, bu odanın şeklini piston üst yüzeyi ile motor kafasının alt yüzeyi belirlemektedir. Yanma odasının yüzey alanının hacmine oranı emisyon açısından önemli bir parametredir. Yanma odasının şekli yuvarlak (küre benzeri) ise hacmi büyük buna karşın yüzeyi az olur ve yanma sırasında dışarı iletilen ısı az olacağından sıcaklıklar yüksek olur. Aksi durumda, diğer bir deyişle yanma odasının uzun ve ince bir şekle sahip olması durumunda ise sıcaklıklar düşük olacaktır.

Yüzey/hacim oranı yanma odasının geometrisine, yani çap/strok oranına ve sıkıştırma oranına bağlıdır. Bu büyüklükler Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Ayrıca silindir kafasının ve piston üst yüzeyinin geometrisi de yanma odasının yüzey/hacim oranını etkiler.

Eğer strok/çap oranı 1 den küçükse, silindir çapı stroka göre büyüktür (kısa stroklu motor = yüksek hızlı motor). Eğer bu oran 1 den büyükse strok silindir çapından daha büyüktür (uzun stroklu motor = düşük hızlı motor). Ölü hacim ise, piston ÜÖN’ya ulaştığında silindir içinde kalan hacmi belirlemektedir.



Şekil 2.2. Piston-biyel mekanizmasına ve yanma odası şekline ait büyüklükler.

Yanma odası sıcaklığının egzoz emisyonuna etkisi aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Yanma odasının yüzey sıcaklığı malzemenin dayanma sınırı nedeniyle, dizel motorlarında 350 C° , benzin motorlarında ise 250 C° 'yi aşmamalıdır. Ancak bu kadar düşük sıcaklıklarda yanmanın yüzeye kadar ilerlemesi mümkün olmamakta ve alev yüzeye yakın bölgelerde sönmektedir. Sözü geçen alev sönme bölgesinde yanma tamamlanamadığı için egzozdan tam yanmamış yakıt (HC - hidrokarbon) atılmaktadır.

Sonuç olarak, alev sönme bölgesindeki artış doğrudan HC emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Burada sözü edilen HC emisyonundaki artış dizel motorunda benzinli motora göre çok daha azdır. Bunun nedeni ise, dizel motorunda silindire sadece havanın emilip yakıtın ise sıkıştırma sonuna doğru püskürtülmesi ve püskürtülen yakıtın soğuk cidarlara yaklaşımadan yakılmasıdır (heterojen karışım: yakıt ile hava silindir içinde her bölgeye eşit oranda karışmamış olup yakıt demetinin

püskürtüldüğü yerlerde yakıt çok hava az, silindir cidarlarına yakın bölgelerde hava çok yakıt az bulunmaktadır). Buna karşılık benzin motorunda silindir içine homojen yakıt hava karışımı (yakıt ile hava silindir içinde her bölgeye eşit oranda dağılır) emildiğinden soğuk cidarlara yakın bölgelerde de oldukça çok yakıt buharı bulunmaktadır.

Yüzey alanının hacme oranı artınca ısı kayıpları da artığından yanma odası içindeki sıcaklıklar düşecek ve böylece egzozdaki NO azalacaktır. CO emisyonunda ise yüzey/hacim oranına bağlı olarak belirgin bir değişme olmamaktadır. Çünkü bu bileşene sıcaklıktan çok hava-yakıt oranı etkilidir. Benzin motorundan kaynaklanan emisyon miktarları ayrıca yanma odası içindeki hava hareketlerine, bu hareketlerin miktarı ve yapısı ise yanma odasının geometrisine bağlıdır. Yanma odası içindeki hava hareketlerinin artırılması alev hızını da artırmakta ve böylece alev sönme bölgesinin kalınlığı azalarak HC emisyonu olumlu, sıcaklık artmasından ise NO emisyonu olumsuz etkilenmektedir. Benzin motorlarında yanma hızının artırılması ayrıca vuruntu olasılığını da azaltmaktadır.

- **Sıkıştırma oranı (ϵ):**

Sıkıştırma oranının artırılması, yanma odasında, benzin motorlarında yakıt-hava karışımının, dizel motorlarda havanın sıkıştırma sonundaki sıcaklığını (sıkışan gazların sıcaklığı artar) artıracığından ısı verimin artmasını sağlamaktadır. Isıl verimin artması ise yakıtın ısı (daha doğrusu kimyasal) enerjisinin daha yüksek oranda faydalı güce dönüşmesi anlamına gelmektedir. Bu durumda motorun özgül yakıt tüketimi azalmakta (birim güç başına birim zamanda tüketilen yakıt g/ kWsaat veya g / BGsaat) ve maksimum güç de artmaktadır.

Sıkıştırma oranının artışı bir önceki bölümde anlatıldığı gibi yüzey/hacim oranını artırdığından alev sönme bölgesi büyümekte ve HC emisyonu artmaktadır. Ancak sıkıştırma oranının artışı ile güçte de bir artış meydana geldiğinden özgül HC emisyonunda (birim güç başına gram olarak HC emisyonu) artış olmamakta hatta düşüş bile görülebilmektedir. Sıkıştırma oranı artışı ile yanma odası sıcaklıkları arttığından, NO de artış göstermektedir. Motorlarda tasarım aşamasında sıkıştırma oranını belirleyen en önemli etken benzin motorlarında vuruntu sınırı (sıkıştırma oranı arttıkça yakıt hava karışımının kendi kendine yanma odasının çeşitli noktalarında küçük alev çekirdekleri halinde tutuşma olasılığı artmakta), dizel motorlarında ise soğukta ilk hareket olmaktadır (sıkıştırma oranı azaldıkça, soğukta silindir içinde sıkıştırılan havanın sıcaklığı düşük olacağından, ilk hareket zorlaşmakta).

Benzin motorlarında $\epsilon = 8 - 11$, dizel motorlarında ise $\epsilon = 15 - 24$ arasında değişmektedir.

- **Emme kanalı şekli:**

Motorlarda (benzin veya dizel) karışım ve yanma olaylarının iyileştirilmesi için yanma odası içerisindeki hava hareketlerinin ve türbülansın artırılması istenmektedir. Bunu sağlamanın yollarından biri de emme kanalı şeklinin ayarlanmasıdır. Özellikle direkt püskürtmeli motorlarda, silindir içindeki havanın çevresel döngü hareketi (swirl) emme kanalının silindire girişte uygun bir yay çizmesi ile sağlanır.

Ancak emme kanalı, yanma odasındaki hava hareketlerini artıracak şekilde tasarlandığında motorun volümetrik verimi bir ölçüde azalacak ve motorun

maksimum gücü düşecektir. Bu nedenle amaca göre geometrinin optimize edilmesi gerekmektedir.

- **Supap zamanlaması:**

Emme ve egzoz supaplarının açılma-kapanma zamanlamasında, motorun çalışma koşullarını en çok etkileyen parametrelerden biri, egzoz supabının kapanma ve emme supabının açılma zamanıdır. Çünkü emme olayının başlangıcı ile egzoz gazlarının atılması sonu birbirine çok yakın zamanlarda olmakta hatta kesişmektedirler (supap bindirmesi: emme ve egzoz supaplarının aynı anda açık kalması). Egzoz ve emme supaplarının birlikte açık kalma süresi emisyonubüyük ölçüde etkilemektedir.

Emme ve egzoz olayının kesişmesinin uzaması yüksek devirlerde egzoz gazlarının atımını kolaylaştırır ve motor gücünü artırır. Ancak bu durumda düşük devirlerde motor düzgün çalışmayabilir ve benzin motorlarında emilen taze karışımın bir bölümünün egzozdan kaçması, HC emisyonunu artırır.

Buna karşılık supap bindirme süresi kısa tutulursa, egzoz gazlarının bir bölümü dışarı atılmayarak, emme kanalından giren taze dolgu ile karışır ve yanma sonu sıcaklığı düşer (egzoz gazları tekrar reaksiyona katılmazlar). Bu da NO emisyonunu azaltıcı yönde etkiler. Egzoz supabının açılma zamanı ise HC emisyonunu etkilemektedir. Erken açılma durumunda silindir içinde yanmanın tamamlanamaması dolayısıyla egzozdaki HC emisyonunda artış olacaktır. Egzoz açılma zamanının NO emisyonu üzerinde etkisi yok denebilir.

- **Ateşleme sistemi (buji sayısı, konumu ve tipleri):**

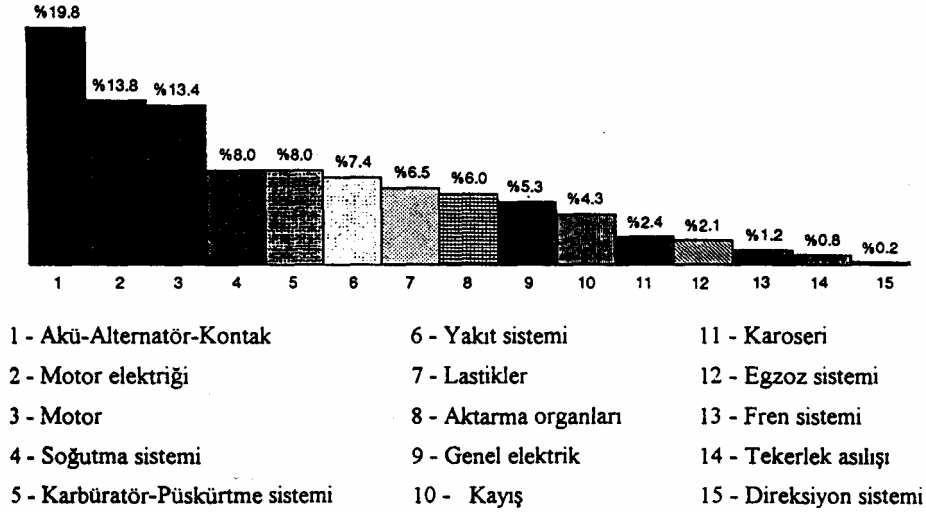
Bilindiği gibi ateşleme sistemi benzin motorlarında kullanılmaktadır. Bujinin motor kafasındaki yeri ve silindir başına buji sayısı ve bujinin cinsi (sıcak veya soğuk buji) motorun HC ve NO emisyonlarını, gücünü ve vuruş olasılığını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca özgül yakıt tüketiminde de (birim güç başına yakıt tüketimi) düşüş olmaktadır. Öte yandan hızlı püskürtme sonucu yanma odası içinde, ilk püskürtülen yakıtın tutuşmasının gecikmesi ve bunun sonucunda yanma odasında biriken yakıtın hızla yanması, silindir içi basıncının da hızla yükselmesine neden olduğundan motorun gürültüsü artmaktadır (özellikle soğuk havalarda, dizel motorlarında ilk çalıştırmada yukarıda sözü geçen tutuşma gecikmesi, yanma odası sıcaklığının düşük olmasından dolayı meydana gelmekte ve buna bağlı olarak gürültülü çalışmaktadırlar - dizel vuruntusu).

2.1.4.3. Taşıt Motorunun Bakım ve Ayarının Egzoz Emisyonlarına Etkisi.

Bir taşıtın daha az kirletici egzoz gazı üretecek ve daha az yakıt tüketen şekilde tasarlanması ve üretilmesi yeterli olmamaktadır. Bu özelliklerin kullanım sırasında aracın tüm ömrü boyunca ilk halde veya buna yakın bir düzeyde korunması gerekmektedir.

Her tip taşıt ve kullanım şartları için teknik bakım aralıkları ve kapsamı üretici firmalar tarafından belirtilmektedir. Taşıtın egzoz emisyonu ve yakıt tüketimini etkileyen kullanım, bakım ve ayar koşullarının yerine getirilmemesi, bir çok parçanın ve donanımların da kötüleşmesine neden olmaktadır. Şekil 2.3'de

Alman Otomobil Klübü (ADAC) tarafından 1995 yılında yayınlanan ve 1 ila 6 yaş arasında bir milyonun üzerinde taşıtın arıza dağılımları grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 2.3. ADAC tarafından 1995 yılında 1 – 6 yaş arasında 1294158 adet taşıtta karşılaşılan arızaların dağılımı.

2.1.4.4. Ateşleme sistemi:

Taşıtların orijinal teknik özelliklerinde çeşitli nedenlerle sonradan meydana gelen değişmelerin, taşıt egzoz emisyonuna ve yakıt tüketimine etkileri konusunda farklı ülkeler ve kuruluşlarda araştırmalar yapılmıştır. Böyle bir araştırmada sürücülerinin arızasız ve kullanılabilir dediği taşıtların da arızaları ve ayar bozuklukları incelenmiştir. Örneğin karbüratörlü benzin motoru ile donatılmış olan taşıtlar için bu arızalar ve ayar bozuklukları şöyle sıralanmaktadır:

- Yakıt-besleme sistemi: %30 – 40,
Ateşleme Sistemi: %25 – 30,

Motorun kendisi: %20 – 25,

Şasi, karoseri ve yürüyüş aksamı: %15.

Arızaların sistemler içindeki dağılımı ise şöyledir:

- Ateşleme sistemindeki arızalar:

Ateşleme bujilerinin kısmen veya tamamen bozulması %63,

Ateşleme avansının bozulması %16,

Kesici (platin) uçları kapalı kalma açısının bozulması %13.

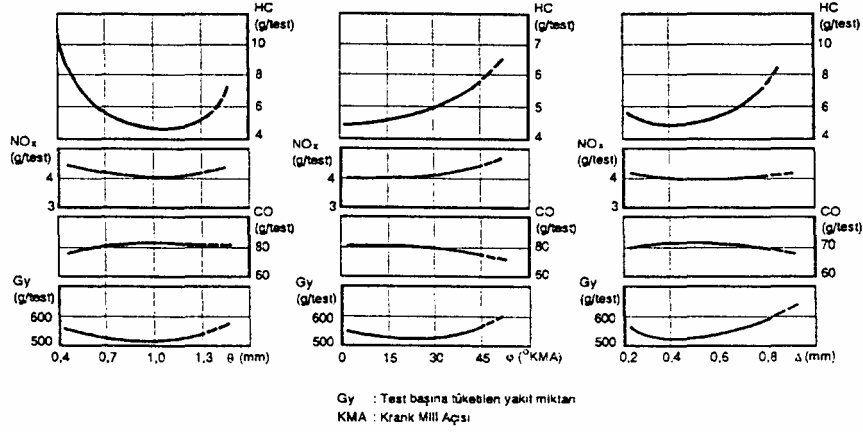
- Yakıt-besleme sistemindeki arızalar:

Boşta çalışmada CO emisyonunun sınırı aşması (aşırı zengin karışım) %70,

Yük rejimlerinde karışımın aşırı zenginleşmesi %23,

Karışımın fakirleşmesi %7–9.

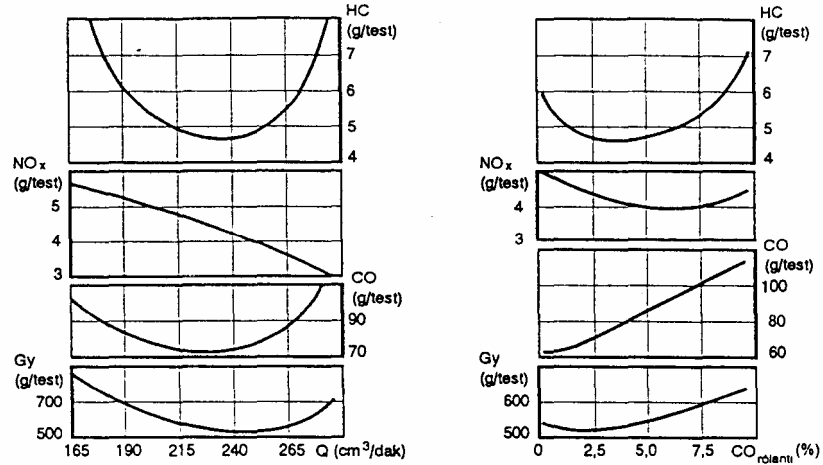
Şehir içi seyir çevrimleri kullanılarak yapılan deneylerde de, üretici firmanın önerdiği ayar sınırlarının dışına çıkılmasının egzoz kirletici gazlarının ve yakıt tüketiminin artışına neden olduğu saptanmıştır.



Şekil 2.4. Ateşleme bujileri elektrot aralığı θ , ateşleme avansı açısı ϕ ve kesici uçları aralığının (platin açıklığı) Δ egzoz kirletici gazları ve yakıt tüketimine etkileri.

Şekil 2.4’de benzin motorlarının ateşleme sistemindeki (klasik ateşleme sistemi) çeşitli ayarsızlıkların belli bir şehir içi çevriminde egzoz emisyonlarına ve yakıt tüketimine olan etkileri gösterilmiştir.

Şekil 2.5’de ise benzin motorunun karbüratör sistemindeki ayarsızlıkların egzoz emisyonlarına ve yakıt tüketimine olan etkileri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Karbüratörün ana yakıt düzeneği yakıt memesi debisinin (Q) ve boşa çalışmadaki CO miktarının egzoz kirletici gazları ve yakıt tüketimine etkisi (rölanti en düşük düzgün çalışma devir sayısında ayarlanmıştır).

2.1.4.5. Benzin Motorlarında Bakım ve Ayarın Egzoz Emisyonlarına Etkisi

Benzin motorlarında egzoz gazı emisyonları seviyesi büyük ölçüde motor ayarlarına bağlı olduğundan, en ufak bir ayar bozukluğu durumunda, zaten zorlukla sağlanabilen emisyon sınırları dışına çıkmaktadır. Bir önceki bölümde konuya giriş olarak, şekil 2.4 ve 2.5 ile gösterilen benzin motorundaki, güç, yakıt tüketimi gibi motor özellikleri yanında, emisyon miktarlarına da etkili olan ve bazıları kullanıcı tarafından ayarlanabilen büyüklükler bu bölümde ana başlıklarla aşağıda verilmiştir.

- **Hava - yakıt oranı**

Benzin motorları, normal ayarlan ile çalışırken bile yüksek oranlarda CO, HC ve NO yaymaktadır. Daha önce de sözü edildiği gibi, emisyon miktarlarını etkileyen en önemli değişken Hava Fazlalık Katsayısıdır. HFK ayrıca motorun performansını ve özgül yakıt tüketimini de etkilemektedir.

Bu nedenle benzin motorunda güç azaltılmak veya arttırılmak isteniyorsa yakıt miktarı değil HFK sabit kalacak şekilde motora emilen toplam yakıt-hava karışımının miktarı, bir gaz kelebeği yardımıyla emme kanalı kesiti kısılarak veya açılarak ayarlanmaktadır. Bu nedenle benzin motorlarında, ilk hareket, ivmelenme, maksimum güç vb bazı çalışma koşulları dışında hava fazlalık katsayısının stokiyometrik değer (HFK=1) civarında tutulması, karışımın tüm yanma odasında homojen olması (yanma odası içinde her yerde HFK=1 olması), bütün silindirlere gönderilen yakıt ve hava miktarlarının eşit olması (her silindire giden yakıt-hava karışımında HFK=1 olması) ve çevrimden çevrime farklılıkların olmaması (silindir içindeki ve silindirler arasındaki düzgün HFK dağılımının her çevrimde sağlanabilmesi) amaçlanmaktadır. Karışım oluşturma sisteminin bütün bu şartları sağlamasının mümkün olmadığı durumlarda, silindir içinde bölgesel olarak zengin ve fakir karışımlar oluşmakta ve silindirler arası farklılıklar ortaya çıkmaktadır Bu durumda emisyonlarda artış olacaktır

Benzin motoru eksik hava ile (zengin karışım) çalıştığında CO emisyonu hızla artmaktadır. CO emisyonunun ana nedeni, yanma sırasında yeterli havanın olmamasıdır. Az hava ile yanma durumunda yakıtın karbonunun tümü CO₂'ye dönüşmemekte ve CO olarak kalmaktadır.

Hidrokarbon emisyonları zengin karışımlarda yanma tamamlanamadığı için artmakta, karışımın fakirleştirilmesi ile de azalmaktadır. Ancak çok fakir karışımlarda yanma tekrar kötüleştiği için, motorun tasarımına da bağlı olarak, belirli bir hava fazlalık katsayısı değerinden sonra yanmamış HC'lar tekrar artış gösterir NO emisyonları ise HFK'nın 1.1 değeri civarında bir maksimumdan geçerek zengin ve fakir karışımlara doğru gidildikçe azalmaktadır. Karışımın zenginleştirilmesi

sonucu ortamda yeterli hava bulunmaması, fakirleştirilmesi durumunda da sıcaklıkların düşmesi ile NO'lerin azalmasına neden olmaktadır.

Karbüratör veya püskürtme sistemindeki bir arıza veya ayar bozukluğu hava fazlalık katsayısını değiştirerek doğrudan yanma sürecini, dolayısıyla emisyonları ve yakıt tüketimini etkiler.

En çok karşılaşılan boşa çalışma (rölanti) ayarsızlığıdır. Benzin motoru boşa çalışırken, ateşleme koşullarının iyi olabilmesi için, karışım içindeki yakıt miktarı artırılmaktadır (zengin karışım). Bu durumda hava yetersiz kaldığından CO ve HC emisyonları çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu bakımdan, özellikle boşa çalışma durumunda, karbüratör ve benzin püskürtme sistemi ayarlarının çok iyi olması ve motora, imalatçının öngördüğü miktardan daha fazla yakıt gitmemesi çok önemlidir.

Modern elektronik kontrollü benzin püskürtmeli motorlarda ise, boşa çalışma sırasındaki yanma koşulları, karbüratörlü motorlara göre iyileştirilmiştir. Bu bakımdan bunlarda hava fazlalık katsayısı sürekli olarak ölçülerek kontrol edilmekte ve boşa çalışırken bile HFK=1 civarında kalması sağlanmaktadır. Bu nedenle bu motorlarda boşa çalışma emisyonları çok düşüktür (karbüratörlü motorlardan 4-5 kez daha düşük). Bu motorlarda ayrıca ayar bozukluklarının, boşa çalışma sırasında, HFK'na etkisi de çok aza indirilmiştir.

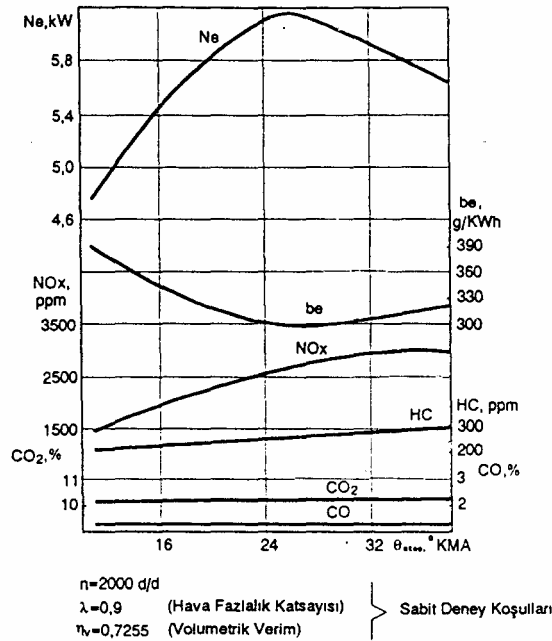
- **Ateşleme avansı**

Benzin motorlarında ateşleme noktası motor gücüne ve yakıt tüketimine çok etkilidir. Ateşleme noktası, boşa çalışma dönme sayısında, motor tipine bağlı olarak, piston üst ölü noktaya gelmeden 0° KMA (krank mili açısı) öncedir. Dönme sayısı arttıkça bu nokta da, üst ölü noktadan 30° - 50° KMA önceye kayar. İmalatçı

firmalar ateşleme avansını (ateşlemenin ÜON dan önce yapılması) genelde en düşük yakıt tüketimi elde edilecek şekilde verirler.

Ateşleme avansının artırılması sonucu motor gücü bir miktar artarsa da, yakıt tüketimi ve genellikle kirletici egzoz emisyonları da artar. Ateşleme avansının azalması ise genelde NO emisyonunu azaltmakla birlikte, güçte büyük bir düşme ve yakıt tüketiminde artış getirdiği için istenmez.

Daha önce Şekil 2.4’de klasik ateşleme sisteminde görülen ayarsızlıkların şehir içi çevrimdeki egzoz emisyonu ve yakıt tüketimi üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil 2.6’da ise benzinli bir motorun sabit devir sayısı, yük, hava fazlalık katsayısı ve volümetrik verim koşullarında ateşleme avansının egzoz emisyonları, güç ve özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkileri gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Benzin motorlarında ateşleme avansının ($\Phi_{ateş}$) motor gücü (N_e), özgül yakıt tüketimi (b_e) ve egzoz emisyonlarına etkisi.

- **Kesici kontak (platin) aralığı**

Elektronik ateşleme sistemine sahip olmayan benzin motorlarında ateşleme için gerekli yüksek gerilim, alçak gerilimli ateşleme devresi üzerinde bulunan bir kesici kantağın periyodik olarak açılıp kapanmasıyla üretilmektedir. Bu kantağın açılma aralığının imalatçı tarafından verilen değerin dışına çıkması veya kontak yüzeylerinin aşınması durumunda yeterli ateşleme gerilimi sağlanamayacağından bujilerdeki kıvılcım enerjisi de düşük olacak ve buna bağılı olarak yanma kötüleşecektir. Bir çok durumda tutuşma hiç olmayabilir Bu durum ise CO ve HC emisyonlarını ve yakıt tüketimini önemli ölçüde artırır. Kontak aralığının öngörülen değerde olmaması, ateşleme avansını da çok değıştireceğinden, emisyonu ve yakıt tüketimine olumsuz etki yapar (Şekil 2.4).

- **Bujilerin ve yüksek gerilim kablolarının durumu**

Ateşlemeyi sağlayan elemanlar olarak bujiler, yakıt tüketimi, güç ve egzoz emisyonu üzerinde oldukça etkilidir. Elektrot aralığı uygun olmayan, elektrot yüzeyleri aşınmış veya genlim izolasyonu yeteneğini kaybetmiş bujiler nedeniyle emisyonlarda bir kaç misli artış ortaya çıkabilir.

Motordaki ayarsızlıkların emisyonu etkileri en sağlıklı biçimde seyir çevrimi deneyleriyle görülebilmektedir. Örneğin motorun yanma odasındaki CO oluşumuna ateşleme avansının sabit rejimde (sabit dönme sayısı ve gaz pedalı konumu) etkisi yoktur Oysa seyir çevrimi uygulamasında ateşleme avansındaki sapmalar motorun gücünü düşürmekte, bu da yakıt miktarının artırılmasını gerektirmektedir. Sonuçta toplam egzoz gazların miktarı artmakta, CO miktarı da ağırlık olarak artmaktadır.

Yine aynı biçimde, motorun bir silindirindeki ateşleme (tutuşma) aksaklıkları HC'ların 6 – 8 kat artışına neden olacaktır. Fakat bu durumda istenen gücü elde

etmek için diğler silindirler daha açık gaz kelebeği konumunda çalışacağından karışım daha iyi bir şekilde yanacaktır. Böyle bir durumda ise boşta çalışmada ve düşük yüklerde CO emisyonu daha az olacaktır. Bu olay, egzoz gazlarını ölçerek motorun teknik durumunu kontrol etmek istediğimizde sadece CO'lerin değil, HC'ların da konsantrasyonunun ölçülmesi gerektiğini göstermektedir.

- **Piston - silindir grubundaki aşınmalar**

Piston - silindir grubundaki aşınmalar HC emisyonunu artırmaktadırlar. Yanma odasına kaçıp yanmaya katılan yağ miktarının artmasından ve karter kaçaklarının çoğalması nedeniyle gazların kapalı karter havalandırma sisteminden geçişlerinin artmasından dolayı kanserojen HC emisyonlarında artış olmaktadır. Piston-silindir grubundaki aşınmalar, karter gazlarının, toplam egzoz gazları emisyonundaki payını artırmaktadır. Motorun aşınması sınır seviyeye geldiğinde emisyonlar ortalama olarak %50, yakıt tüketimi ise %15 artış göstermektedir.

- **Yanma odası cidarlarındaki birikimler**

Silindir cidarlarında oluşan birikimler yüzeyin ve dolayısı ile alev sönme bölgesinin artmasına neden olur ve HC emisyonları artar. Cidarlarda oluşan karbon birikimleri ayrıca sünger şeklindeki yapılan nedeniyle yakıtı bünyelerinde biriktirerek yanmasını önlerler ve HC emisyonu ayrıca artış gösterir. Burada biriken yakıt genişleme zamanında basınç düştüğünde tekrar serbest kalır, ancak bu arada sıcaklık düşmüş olduğundan bu yakıtın tümü yanmaz. Cidarlardaki birikimlerin sıkıştırma oranını arttırıcı etkisi de bulunmaktadır. Bu etki de HC emisyonlarının artışına neden olur.

2.1.5. Motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticilere karşı alınan önlemler

Taşıtlarda kirletici egzoz emisyonlarının azaltılması yönünde alınan önlemler niteliklerine göre üçe ayrılmaktadırlar.

Birincil (primer) önlemler - kaynak öncesi önlem, taşıt motorunda kullanılan yakıt bileşiminin kirletici emisyonu azaltıcı yönde hazırlanması.

İkincil (sekonder) önlemler - kaynağında önlem, kirletici bileşenlerin motorda yanma sırasında ve diğer motor içi kaynaklarda oluşumunu azaltmak. Taşıt motorunun silindir içindeki yanma sırasında ürettiği kirletici bileşenlere karşı alınan önlemler dolaylı olarak, daha önce “Motorun Yapısal Özelliklerinin Emisyona Etkisi” başlığı altında büyük ölçüde açıklanmıştır. Diğer ikincil önlemler ise (karter havalandırması, depo havalandırması, egzoz gazı geri dolaşımı, fakir karışimli motor vb.) bu bölümde incelenecektir.

Üçüncül (tersiyer) önlemler - kaynak sonrası önlem, oluşumuna engel olunamayan kirletici bileşenlerin daha sonra egzoz gazı içinden temizlemek (termik reaktör, katalitik konvertör, partikül filtresi vb.).

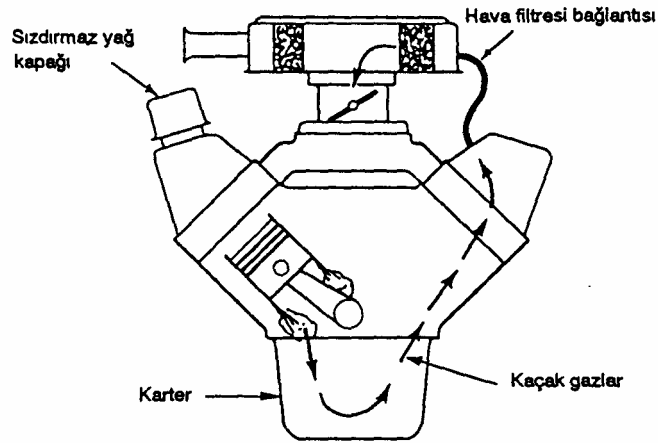
2.1.5.1. Benzin Motorlu Taşıtlarda Alınan Önlemler

Benzin motorunda ikincil önlemlerin (kaynağında önlem) silindir içi yanma ile ilgili bölümü büyük ölçüde anlatılmıştır. Bunun dışında kalan başlıca ikincil önlemler şu şekilde sıralanabilir.

- **Karter havalandırması:**

İlk kaynağında kontrol yöntemlerinden biri olarak, karter havalandırması, karterden çıkan kirleticilerin atmosfere yayılmasını önlemek amacıyla 1961 yılında

ABD'in Kaliforniya eyaletinde uygulamaya başlanmıştır. Silindir ile segmanların arasından sızarak kartere geçip buradaki yağ buharı ile karışan yanma odası gazları motorun emme manifolduna geri gönderilmektedir. Böylece karterdeki kirletici gazların dış ortama atılması önlenmiş olmaktadır. Bu yöntem (pozitif karter havalandırması) özellikle toplam HC emisyonunun düşürülmesinde oldukça etkilidir. Çünkü karter havalandırması taşıtın toplam HC emisyonunun %20'sini oluşturmaktadır. Şekil 2.7'de kapalı (pozitif) karter havalandırma sistemine bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.7. Kapalı (pozitif) karter havalandırma sistemi.

- **Depo havalandırması:**

Benzin buharı toplama sistemlerinde, yakıt deposundan ve motorun yakıt sisteminden buharlaşan yakıt, borular yardımıyla bir aktif karbon filtre elemanına gönderilmektedir. Yakıt buharı filtrenin kömürüne emdirilir ve geriye kalan temiz hava dışarı atılır. Motor çalıştığı zaman, ters akımla, filtreye emdirilmiş olan yakıt,

motorun yakıt sistemine geçer ve yakılır. Böyle bir sistem ile donatılmış bir binek taşıtında, yılda 15000 km yol yapması halinde, yıllık yakıt buharı kaçağı yaklaşık 300 g'a düşmektedir. Şekil 2.8'de kapalı depo havalandırma sistemine bir örnek verilmiştir.

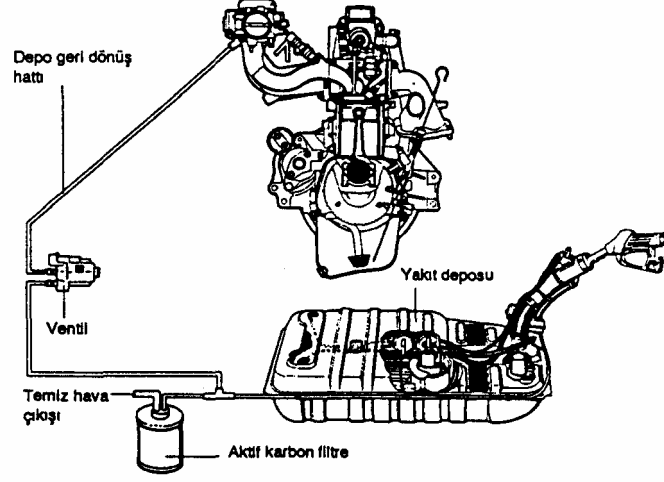
- **Egzoz gazı geri dolaşımı (Egzoz Gazı Resirkülasyonu - EGR):**

Yanma sırasında oluşan NO miktarı büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Yanma odası içerisindeki karışımın egzoz gazları ile seyreltilmesi sonucu yanma sonu sıcaklıkları, dolayısıyla üretilen NO miktarı düşmektedir. Bu, hem dizel hem de benzin motorlarında kullanılan oldukça etkili bir yöntemdir. Bu amaçla egzoz gazının bir miktarı, soğutulduktan sonra, emme manifolduna geri gönderilmektedir.

Benzin motorunda egzoz gazı geri dolaşımı yanma odasına emilen toplam dolgunun %10'u düzeyinde olduğunda, NO, emisyonu % 50 - 60 kadar azalmaktadır. Dizel motorları değişken hava fazlalığı ile çalıştığından bunlarda, yanma odasına geri gönderilen egzoz gazı yüzdesi daha yüksek tutulabilir. Ancak bu uygulama hava içindeki oksijen miktarını düşürdüğünden, benzinli motorlarda HC emisyonunda, Diesel motorlarda ise partikül (is) emisyonunda bir miktar artışa neden olmaktadır.

Bu yöntemde en son eğilim ise "dahili EGR" diye de anılan, sıcak egzoz gazlarının bir kısmının silindir içinde bırakılmasıdır. Benzin motorunda bu yöntemin, yakıtın daha hızlı buharlaşarak karışımın oluşmasını hızlandırma ve tutuşmaya hazırlama gibi bir faydası da vardır. Bu şekilde, özellikle düşük yüklerde HC ve CO emisyonlarında da iyileşme elde edilmektedir. Ancak optimum EGR miktarının sağlanması için ayarlanabilir kam mili (değişken supap zamanlaması) kullanılması gereklidir.

Yanma odası sıcaklığı yüksek olduğu için egzoz gazı geri dolaşımı özellikle direkt püskürtmeli dizel motorlarında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.



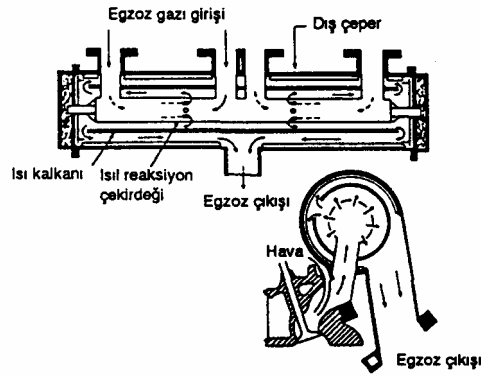
Şekil 2.8. Kapalı depo havalandırma sistemi.

- **Fakir karışumlu motor:**

Benzin motorlarında uygulanan ve yakıt tüketimine getirdiği iyileşme nedeniyle de kullanım alanı bulan bir tekniktir. Burada hava fazlalık katsayısı $HFK = 1.1 - 1.4$ olacak şekilde yakıt hava karışımı hazırlanmaktadır. Ancak bu fakir karışımı kararlı bir şekilde tutuşturmak için önlemler alınması, örneğin yüksek güçlü ateşleme sistemleri, özel bujiler vb. kullanılması gerekmektedir. Fakir karışumlu yanma halinde, CO ve NO (sıcaklıklar düştüğünden) düşmekte ancak tutuşma şartları iyileştirilmediğinde HC emisyonları artmaktadır. Benzin motorlu taşıtlarda kirletici egzoz emisyonlarına karşı alınan başlıca üçüncül önlemler ise termik reaktör ile katalitik konvertörlerdir.

- **Termik (ısıl) reaktör:**

Termik reaktör sistemlerinde egzoz gazları, egzoz sisteminde yer alan, belirli bir sıcaklığa sahip (600 - 700 °C) bir odada, bir süre bekletilerek ve sisteme ilave hava gönderilerek CO ve HC'ların okside olması sağlanır (Şekil 2.9). Ancak termik reaktörler NO in azaltılmasında etkili olamamaktadır. 70'li yılların başında güncel olan termik reaktörler bugün tamamen terkedilmiş ve yerini katalizatöre bırakmıştır.

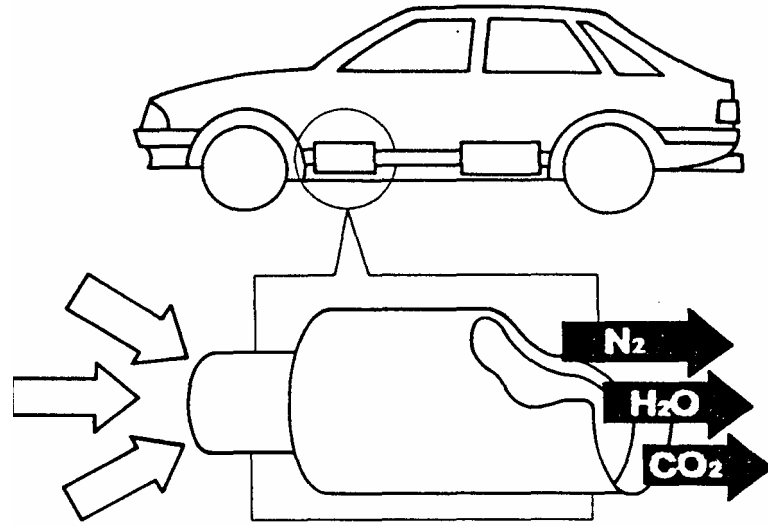


Şekil 2.9. Egzoz gazı içindeki CO ve HC'ların yüksek sıcaklıkta okside olmasını sağlayan termik (ısıl) reaktör.

- **Katalitik konvertörler (katalizatör):**

Motorlarda yanma sonucu oluşan HC ve CO emisyonları katalitik oksidasyon konvertörü veya NO, HC ve CO emisyonları, aynı anda, 3-yollu katalitik konvertör kullanılarak egzoz sisteminde %90-95'e varan oranlarda zararsız hale dönüştürülmektedir. Günümüz ve gelecekteki emisyon standartlarının sağlanmasında benzin motorlu taşıtlarda katalitik konvertör kullanımı bir zorunluluk haline gelmiştir ve dizel motorlu taşıtlarda da (HC ve CO için) zorunluluk haline gelmektedir.

Egzoz gazları katalitik konvertörün içinden geçerken sağlığa zararlı olan NO'ler indirgenerek O₂ ve N₂'ye dönüştürülür. Aynı anda NO_x'lerin indirgenmesinden elde edilen O₂ yardımıyla, CO ve HC okside olarak (yakılarak) sağlığa doğrudan zararı olmayan CO₂ (karbondioksit) ve H₂O (su) ya dönüştürülür.



Şekil 2.10. Katalitik konvertörün işlevi.

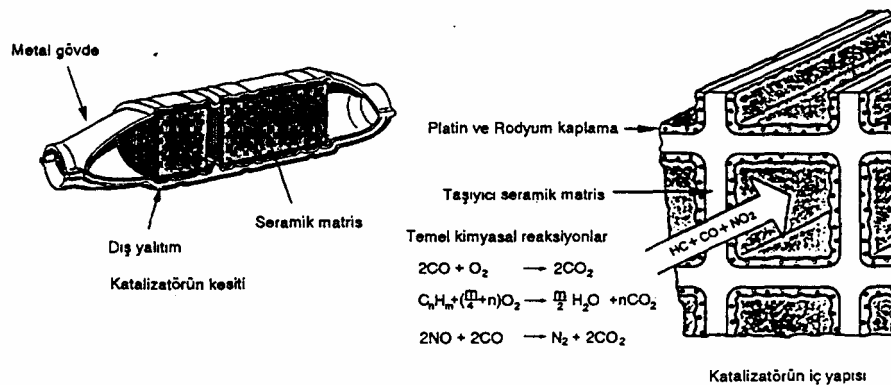
Katalitik konvertörlerde genellikle petek şeklinde, yüzey alanı çok geniş, seramikten (Magnezyum-Alüminyum Silikat) veya metalden yapılmış taşıyıcı bir eleman bulunmaktadır. Petek yapıdaki kanal sayısı yoğunluğu 60-70 kanal/cm² kadardır. Bu taşıyıcının yüzeyi ayrıca pürüzlü ara tabakayla (Mg-Al₂O₃) kaplanır. Böylece yüzey alanı 1 litre konverter hacmi başına 20000 m²'ye ulaşmaktadır (Şekil 2.10).

Katalitik konvertörlerin seramik yerine metal taşıyıcı ile yapılması ise, taşıyıcının daha ince olmasından dolayı toplam petek yüzeyinin büyük

tutulabilmesini sağlar. Bunlar aynı kapasitedeki seramik taşıyıcının yarı hacminde olabilirler.

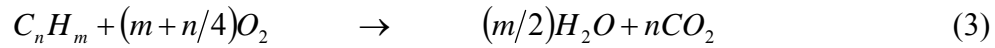
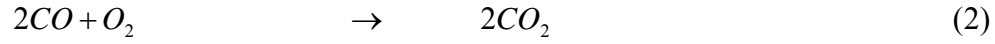
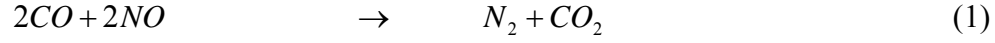
Metal taşıyıcılar seramiğe göre daha düşük bir ısı kapasiteye sahiptir ve bu nedenle çok daha hızlı bir şekilde istenen sıcaklığına ulaşabilir. Metal taşıyıcılar ayrıca, sıcaklığa daha dayanıklı oldukları için, motora daha yakın bir konuma yerleştirilebilirler. Bu da katalizatörün ısınarak yüksek dönüştürme verimine ulaşmasını ayrıca hızlandırır.

Taşıyıcının üstünde bulunan yüzey genişletici ara tabakanın üstü ise, egzoz gazlarındaki kirleticileri katalitik etki ile temizlemek için, platin (Pt), palladyum (Pd) ve rodyum (Rh) gibi soy metallerle kaplıdır. Bu metaller egzoz gazları ile reaksiyona girmeyip sadece normal egzoz şartlarında (düşük sıcaklık ve kısa zaman içinde) oluşmayacak reaksiyonların oluşması için aracılık ederler (Şekil 2.11). Bu soy metallerin miktarı, ortalama olarak, katalitik konverter başına 1-2 g'dır. Platin ve palladyum CO ve HC'nin oksidasyonuna aracılık ederken, rodyum, NO indirgeyici reaksiyonlar için gereklidir.



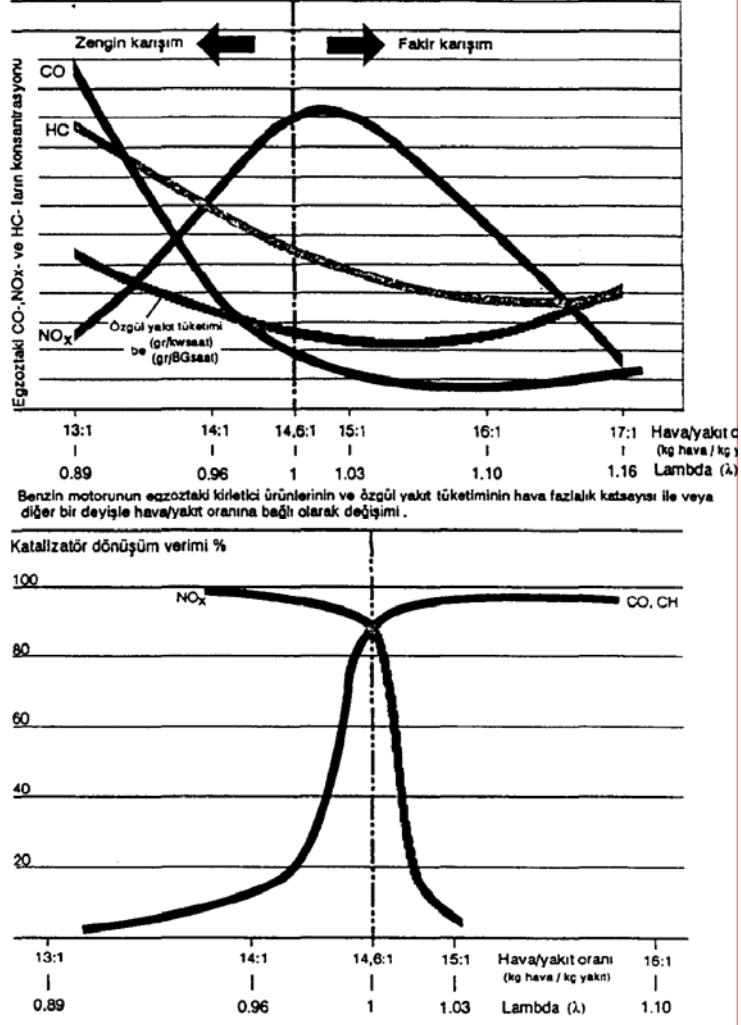
Şekil 2.11. Katalitik konvertörün iç yapısı.

3-yollu bir katalitik dönüştürücüde NO, N₂'ye, HC ve CO ise CO₂ ve H₂O'ya dönüşürken çok sayıda ara reaksiyon gerçekleşmektedir. Bunlardan önemli olanları aşağıda verilmiştir.



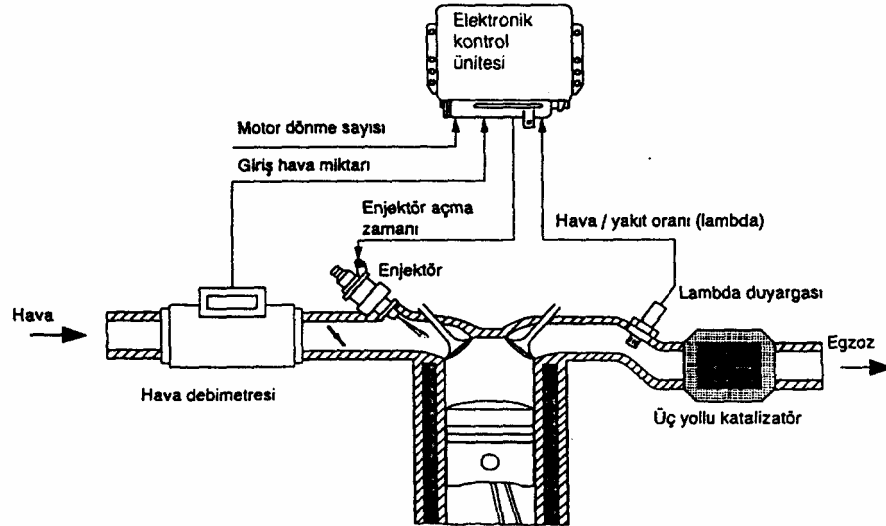
Burada sözü geçen üç yollu deyimi katalitik konvertörün egzoz gazındaki CO, HC ve NO olmak üzere her üç kirleticiyi aynı anda zararsız ürünler haline dönüştürmesinden dolayı kullanılmaktadır. Her üç bileşenin katalizatör yardımıyla yüksek verimle temizlenebilmesi için, en önemli şart yakıt-hava karışımı oranının HFK = 1 olacak şekilde hassas ayarlanmasıdır. Eğer karışım fakir olursa (hava çok) egzoz gazı içindeki O₂ konsantrasyonu artacak ve (2) no'lu reaksiyon hızlanacaktır. Bu durumda azot oksit indirgeyici (1) no'lu reaksiyonun oluşması için ortamda yeterli CO kalmayacak ve dönüşen NO miktarı azalacaktır. Eğer karışım zenginleşirse (hava az), tam aksine O₂ miktarı azaldığı için oksitlenen CO ve HC miktarı azalacaktır. 3-yollu katalitik dönüştürücü, eğer HFK = 1 civarında ± % 0.5 toleransla çalışırsa verimi % 80'in üstünde kalmaktadır. Bu toleransın dışında kalan bölgelerde ise dönüştürme verimi hızla düşmektedir.

Şekil 2.12-b'de HFK'nın katalizatör dönüştürme verimine etkisi görülmektedir.



Şekil 2.12. a) Egzoz emisyonlarının katalizatör öncesi hava fazlalık katsayısına göre değişimi. b) Hava fazlalık katsayısının katalizatörün dönüşüm verimine etkisi.

3-yollu katalizatör ile donatılan motorların diğer bir önemli parçası da lamda vericisidir (λ - sensörü). Lamda vericisi egzoz gazları içindeki oksijen miktarına göre bir çıkış gerilimi üretmektedir. Bu gerilim, çok dar toleranslar dahilinde, $HFK > 1$ için 0, $HFK < 1$ için ise 800 mV (milivolt) mertebelerindedir. Çıkış gerilimi yakıt sisteminin elektronik kumanda ünitesine iletilir ve kumanda sistemi $HFK = 1$ olacak şekilde püskürtülen yakıt miktarını ayarlar. Böyle bir sistemin şeması Şekil 2.13'de verilmiştir.



Şekil 2.13. Elektronik kontrol ünitesi, üç yollu katalitik konvertörlü, lamda vericili ve benzin püskürtme sistemli bir motorun basitleştirilmiş prensip şeması.

Buraya kadar anlatılan üç yollu katalizatörler ancak $HFK = 1$ olan benzinli motorlarda kullanılmaktadır. Fakir karışimli ($HFK > 1$) benzin motorları ve dizel motorlarında ise oksidasyon katalizatörü kullanılmaktadır. Oksidasyon katalizatörü egzoz gazlarındaki oksijen fazlalığından dolayı sadece HC ve CO'ü

dönüştürebilmektedir. Bu tip motorlarda NO, için ise yanma sıcaklığını düşürecek egzoz gazı geri dolaşımı gibi, önlemler almak gerekir. Katalizatörlü taşıt kullanan sürücülerin uyması gereken en önemli nokta ise bu tip taşıtlarda sadece kurşunsuz benzin kullanılması gereğidir. Çünkü benzin içindeki kurşun ve bileşikleri, katalizator içindeki soy metal taşıyan yüzeyi örterek bu metallerin egzoz gazı ile temas etmesini önler ve katalizatörün verimini hızlı bir şekilde düşürür (katalizatörün zehirlenmesi). Ayrıca kurşundan etkilenmeyen tipler de geliştirilmiş olmakla beraber, kurşun genellikle 3- vericinin de etkinliğine engel olmaktadır.

2.1.6. Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Hava Kirliliği ve Önlenmesine Yönelik Tedbirler

Kentlerde ısınmadan kaynaklanan kirlilik kadar nüfus ve gelir düzeyinin yükselmesine paralel olarak artan motorlu taşıtların neden olduğu zararlı egzoz gazları da önlem alınması gereken önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Benzinli ve dizel taşıtların çıkardığı egzoz gazlarında bulunan zararlı maddelerin, özellikle nüfus ve trafiğin yoğun olduğu büyük kent merkezlerinde çevreye verdiği zararlar çok daha fazla olmaktadır.

Motorlu kara taşıt araçlarında egzoz gazı çıkışları yer seviyesine çok yakın olduğundan, atmosfere atık gaz emisyonu yayan diğer kirlenici kaynaklara göre çok daha büyük zararlara yol açmaktadırlar. Bu emisyonlar canlıların solunum yollarında ve kanda çeşitli rahatsızlıklara neden olabilmektedir.

Genellikle kent merkezlerindeki karbon monoksit (CO) emisyonlarının % 70-90'ından azot oksit (NO) emisyonlarının % 40-70'inden hidrokarbon (HC)

emisyonlarının yaklaşık % 50'sinden ve şehirlerde, kurşun emisyonlarının % 100'ünden özellikle motorlu taşıt egzoz gazları sorumludur.

Egzoz kaynaklı kirleticiler iki grupta toplanabilir. Bunlardan birincisi; benzinli araçların egzoz gazlarından çıkan yanmamış hidrokarbonlar (HC), karbon monoksit (CO), azot oksitleri (NO_x) ve kurşundur. İkincisi ise; dizel araçların egzoz gazlarından çıkan; partiküller madde, yanmamış hidrokarbonlar (HC), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO_x) ve kükürt dioksittir.

Dizel motorlar, benzinli araçlara göre daha az CO ve HC emisyonları vermektedir. Ancak, dizel araçlar da SO₂ ve NO_x emisyonlarını daha fazla atmosfere vermektedir Herhangi bir önlem alınmamış dizel motoru, benzin motoruna kıyasla daha az çevre kirliliği yaratmaktadır. Ancak gerekli önlemler alındığında çevre kirliliği, benzin motorlarında daha etkili bir şekilde azaltılabilmektedir. Bu nedenle taşıt araçlarındaki çevre kirliliği önleme çalışmaları daha çok benzin motorlu araçlarda yoğunlaştırılmalıdır.

Motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirliliğini önleyici tedbirler;

- Gelişmiş ülkelerin uygulamakta olduğu insan ve çevre sağlığını koruyan standartların düzenli izlenmesi ve ülkemiz koşullarında uygulanabilirliğinin araştırılarak kendi iç mevzuatımıza uyumun sağlanması,
- Motorlu taşıtlarda egzoz kirliliğini en aza indirecek katalitik konvertör gibi teknik ekipmanların ülkemizde de uygulamaya konulmasının temini ve teşviki ve bu uygulamaya paralel olarak katalitik konvertör ile teçhiz edilmiş araçların kullanması zorunlu olan kurşunsuz benzinin yurt dışında dağıtımının yaygınlaştırılması,

- "Çok kirletenden çok, az kirletenden az vergi alınması" prensibinden hareketle gerekli düzenlemelerinin yapılması,
- Motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirliliğin tespiti ve izlenmesi ile insan ve çevre sağlığına getirdiği zararların tespit edilerek, gerekli koruma ve kirliliği azaltıcı tedbirlerin bir an önce alınmasının sağlanması,
- Egzoz kirliliğinin yoğun olarak yaşandığı büyük kent merkezlerinde, trafik sinyalizasyonlarının sürekli trafik akışını engelleyecek şekilde yanlış planlanması sebebiyle motorlu taşıtların trafikte çok beklemesi sonucu oluşan egzoz kirliliğinin azaltılması için trafik ışıklarının senkronize olarak yeniden düzenlenmesi,
- Egzoz emisyonlarından en çok zarar görebilecek çocukların oyun alanlarının (park, bahçe vb) mümkün olduğu kadar trafiğin yoğun olduğu caddelerden uzak yerlerde planlanması ve yapılması,
- Kış sezonunda konutların ısıtılması sebebiyle artan hava kirliliğine egzoz kirliliğinin katkısını azaltıcı önlemlerin alınması (tek, çift plaka uygulaması gibi),
- Motorlu taşıtlarda üretim aşamasında alınacak tedbirlerin yanısıra halen trafikte seyreden eski teknoloji ile üretilmiş araçların düzenli bakıma ve denetime tabi tutulması gibi önlemler alınmalıdır.

2.1.7. Kirleticiler İçin Ölçü Birimleri

Kirleticinin atmosfer, baca veya egzoz gazı içindeki miktarı kirleticinin cinsine göre:

- Yüzde (%), (örnek: % 2 CO),
- Milyonda (ppm), (örnek 300 ppm HC) veya
- Birim hacimdeki kütleli miktar (mg/m^3), (örnek: 150 mg CO)

şeklinde tanımlanır. Ppm (parts per million) milyondaki partikül anlamına gelmektedir ve hacimsel halde 1 m^3 havadaki cm^3 olarak bileşen miktarını göstermektedir. Bir kirleticinin miktarı % veya ppm ile ifade edilebilir. İki ayrı birim kullanılmasının nedeni şudur:

Ölçüm yapılan yerlerde (örneğin atmosfer havası veya boşta çalışan benzin motorunun egzoz gazı içinde) kirletici konsantrasyonu arasında büyük farklar olabilir. Her koşul ve bileşen için aynı birim kullanılırsa, konsantrasyonlar kullanışsız olan (çok büyük veya çok küçük) sayılarla belirtmek zorunda kalınır. Rölantide (boşta) çalışan bir benzin motoru için CO miktarı % 2 olsun. Bunu ppm olarak ifade edersek 20000 ppm olacaktır. Aynı şekilde atmosfer havasındaki CO in konsantrasyonu 25 ppm ise ve bunu yüzde olarak ifade etmek istersek ölçümü % 0.0025 gibi kullanışsız bir sayı ile belirtmek zorunda kalacaktık. Bu nedenle konsantrasyon göreceli olarak yüksekse % , düşükse ppm kullanılır. Partiküller (katı ve sıvılar) ise genelde ağırlıksal olarak mg / m^3 olarak ifade edilirler.

2.1.8. Kirletici Maddelerin İnsan ve Çevre Sağlığı Üzerindeki Etkileri

Yanma ürünü zararlı maddelerin insan sağlığına olumsuz etkileri alınış sürelerine ve alınan miktarlarına göre değişmektedir. Bu bakımdan üç farklı konsantrasyon tanımlamak mümkündür:

- **MAK (Maksimum Atmosfer Konsantrasyonu) :** Sürekli olarak bulunduğunda zarar vermeyecek miktar.
- **MİK (Maksimum İşyeri Konsantrasyonu) :** 8 saat süre ile bulunduğunda zarar vermeyecek miktar.
- **DTK (Doğrudan Tehlike Konsantrasyonu) :** Çok kısa süre içinde tehlike doğuracak miktar.

Bu tanımlara uygun olarak insan sağlığı açısından mevcut sınırlamalar ppm (milyondaki hacimsel oran - parts per million) veya mg /m³ cinsinden Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Zararlı Maddelerin Tehlike Sınırları⁽¹¹⁾.

Kirletici Maddeler	MAK	MİK	DTK
CO (ppm)	9	50	5000
HC (ppm)	20	300	30000
HC HO (ppm)	0,02	1	650
NO (ppm)	0,15	-	-
NO₂ (ppm)	0,05	5	200
SO₂ (ppm)	0,1	5	400
Pb (mg/m³)	0,003	-	-
Pb(C₂H₅)₄ (ppm)	-	0,01	-

Kirleticilerin yapısı, insan ve çevre üzerine olan etkileri maddeler halinde açıklanmıştır:

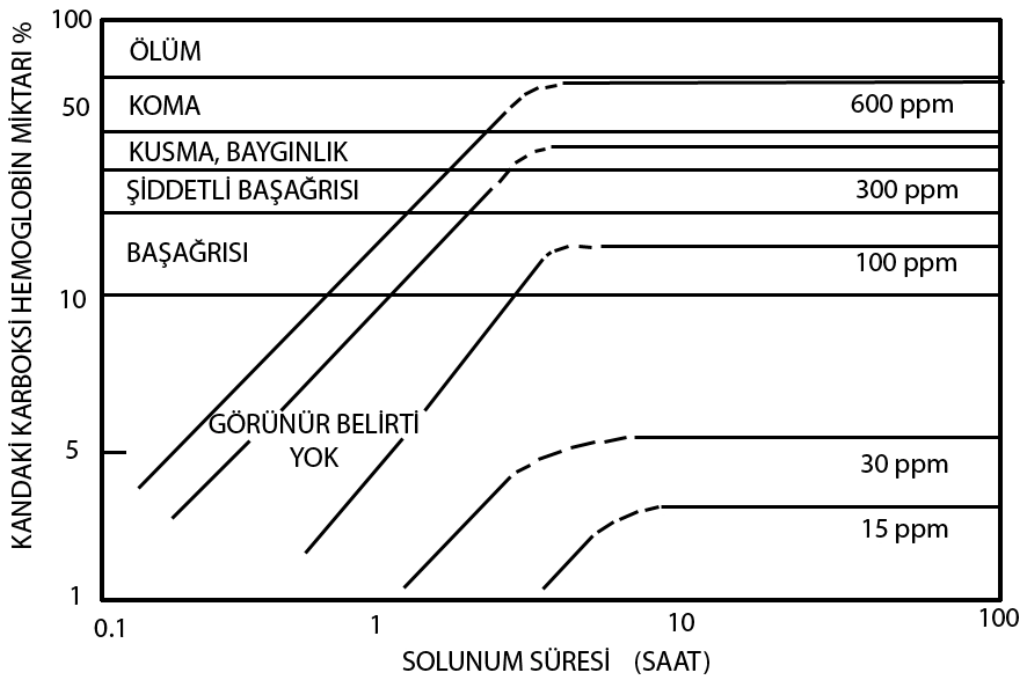
- **Karbon monoksit (CO)**

Kokusuz ve renksiz bir gaz olan CO çok zehirlidir. Bu gazın kandaki oksijeni taşıma görevine sahip olan hemoglobine bağlanma yeteneği oksijene oranla yaklaşık

200 kere daha fazladır. Bu nedenle CO ortamında bulunan bir kişinin solunum yoluyla aldığı CO, kandaki normal hemoglobini bozar, vücut hücrelerinin oksijen alma olanağını engelleyerek zehirlenmeye ve boğulmaya neden olur. Yani CO solunması, akciğerlerden vücut dokularına oksijen taşınmasını bozar.

Belli bir düzeyde kalp yetmezliği olan kişilerde tehlike daha da büyümektedir. Kalp hastalığı olanlar için kritik sınır kandaki karboksihemoglobin oranının %4'e ulaşmasıdır.

Şekil 2.14'de havadaki CO konsantrasyonunun solunum süresine bağlı olarak insan kanındaki karboksihemoglobin oranına ve bunun insan sağlığına olan etkileri gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Havadaki CO konsantrasyonunun ve solunum süresinin insan sağlığı üzerindeki etkisi.

Rölanti ayarı (boşta çalışma) düzgün olan bir benzinli motorun egzozundaki CO konsantrasyonunun % 1-2 arasında yani 10000 - 20000 ppm olduğu düşünülürse ve bu değer yukarıdaki şekil ile karşılaştırılırsa, kapalı bir garajda motor çalıştırmanın ne kadar etkili bir intihar yöntemi olduğu anlaşılır.

Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının ana nedeni oksijenin (O_2) yetersiz olmasıdır. Daha önce de kısaca sözü edildiği gibi 1 kg benzin veya dizel yakıtının tam yanması için yaklaşık 14.5 kg hava gereklidir. Eğer HFK l'den küçük ise, yani yakıt-hava karışımı içinde gerekenden daha az hava var ise yanma yetersiz oksijen ortamı içinde olacak ve yakıtın karbonunun tümü CO_2 'e dönüşemeyerek CO olarak kalacaktır. Motorda silindir içinin tümü ele alındığından oksijen genel olarak yetersiz olabileceği gibi, karışımın tam homojen (silindir içinde her yerde aynı yakıt/hava oranı) olmaması durumunda silindir içinde belirli bir konumda yerel olarak da yetersiz olabilir. Buradan da anlaşılacağı gibi CO oluşumu büyük ölçüde hava fazlalık katsayısına (HFK) bağlıdır.

- **Yanmamış Hidrokarbonlar (HC)**

Yanma sonucu bacalardan ve taşıtlarda yakıt deposu ve karbüratörden buharlaşma yolu ile veya motordan egzoz gazları ile birlikte atmosfere atılan yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbonlar genellikle kötü kokulu ve tahriş edici maddelerdir. Bu tür hidrokarbonlar arasında parafinler ve olefinler solunum yollarındaki mukozayı (iç deriyi) tahriş edici ve bayıltıcı etkileri de bulunmaktadır. Aromatların ise kanser yapıcı özellikleri vardır. Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu (kısmi yanma) sonucu oluşan aldehitler ise keskin kokuları nedeniyle göz ve burun için rahatsız edici etkiye sahiptirler.

Gaz halindeki hidrokarbonlar güneş ışığı altında azot oksitlerle birleşerek “fotokimyasal sis - smog” olarak adlandırılan bir sis tabakası oluştururlar. Bu tabaka gözlerin yanmasına ve sulanmasına, solunum sisteminin etkilenmesine neden olurken, aynı zamanda bitkiler için de zararlı olmaktadır.

Egzoz gazları içerisinde hidrokarbon bulunması yakıtın tam olarak yakılamadığını gösterir. Hidrokarbon oluşumunun ana nedeni sıcaklıkların veya oksijenin yetersiz olması sonucunda (HFK l’den küçük - zengin karışım) yanmanın tamamlanamamasıdır. Bu durum;

- Silindir içinde bazı bölgelerde yakıt-hava karışım oranının çok zengin veya çok fakir olması sonucu oksidasyon reaksiyonlarının yavaşlaması ve yanmanın tamamlanamaması,
- Silindir içerisindeki soğuk cidarlara (silindir, silindir kafası ve piston üst yüzeyi) ısı kayıpları nedeniyle bu bölgeye ulaşan alevin anında sönmesi,

Piston-silindir arası gibi dar bölgelerde alevin ilerleyemeyerek sönmesi nedeniyle oluşmaktadır.

- **Azot oksitler (NO_x)**

Azot oksitler de (NO, NO₂, N₂O₂ vb. bileşiklerin tümü birden NO olarak tanımlanmaktadır) CO gibi kandaki hemoglobin ile birleşmektedir. Ancak azot oksitlerin en önemli zehirleyici etkisi ciğerlerde nemle birleşerek nitrik asit oluşturmasıdır. Oluşan asit miktarının konsantrasyonunun azlığı nedeniyle etkisi de az olmaktadır. Ancak zamanla birikim özelliği bulunduğu için özellikle solunum hastalıkları bulunan kişiler için tehlike yaratmaktadır.

Azot oksitler ayrıca kimyasal sis oluşumunu etkilemektedir. Atmosferde bulunan su ile (yağmur, sis vb.) birleşerek nitrik asit oluşumuna neden olurlar. Böylece atmosferde asit yağmuru olayını meydana getirirler ve bitki örtüsüne zarar verirler.

Azot oksitler içinde NO renksiz, kokusuz bir gazdır. NO₂ ise kırmızı-kahverengi renkli, kötü kokulu, tahriş edici bir gazdır. Yanma ürünleri arasında genellikle NO bulunmasına rağmen, atmosfere atıldıktan sonra bir kısmı NO₂'ye dönüşmektedir. NO gazının ayrıca felç yapıcı özellikleri de bulunmaktadır.

Normal şartlar altında havanın içindeki azot (N₂) yanma sonucu reaksiyona girmez. Ancak motor içindeki yanmada ulaşılan yüksek sıcaklıklarda (1600°C nin üstünde) havanın içerisindeki azotun oksijen ile reaksiyona girmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. Azot oksitler içerisinde ana eleman olarak genellikle NO bulunmaktadır. Egzoz gazlarının daha sonra atmosfere atılması sonucu oksijen ile temasında NO'nun bir kısmı NO₂ ve NO_x'lere dönüşmektedir.

Sonuç olarak, azot oksit oluşumunu silindir içi sıcaklığın büyük ölçüde etkilediği, sıcaklık arttıkça azot oksitlerin hızla arttığı anlaşılmaktadır.

Azot oksit oluşumunu etkileyen bir diğer parametre de HFK'dır. HFK=1.1 civarında (yani azot ile birleşecek oksijenin bulunması durumu) azot oksit oluşumu en fazla olmaktadır. Ancak HFK 1.1'den büyük olursa, yani daha fakir karışım halinde, silindir içi sıcaklık, reaksiyona giren gaz miktarının azalması ile düşer ve NO_x emisyonunda hızlı bir azalma gözlenir.

- **Aldehitler (R.CHO)**

Aldehitler hidrokarbonların kısmi oksidasyonu sonucu oluşan ürünlerdir. Özellikle düşük sıcaklıklardaki reaksiyonlarda oluşurlar. Aldehitler genellikle

formaldehit (HC.HO) ve akrolein (C₂H₃ CHO)'den oluşmaktadır. Dizel egzozundaki kötü kokulu, gözleri ve solunum sistemini tahriş edici etkinin önemli kaynağı formaldehittir.

- **İs, Partiküller (Katı ve sıvı parçacıklar)**

İçten yanmalı motorlar tarafından üretilen katı taneciklerin büyük bir bölümünü is oluşturmaktadır. İs yanmamış karbon partikülleridir ve özellikle dizel motorlarında oluşmaktadır. İs, zararlı bileşenleri bünyesinde taşıyarak ve solunum sisteminde birikerek insan sağlığına zararlı olmaktadır. Dizel motorları egzozundan atılan partiküller karbon- hidrojen zincirinden oluşmakta olup bünyelerinde yanmamış hidrokarbonları, oksitlenmiş hidrokarbonları, polinükleer aromatikleri ve kükürt dioksit, azot oksit ve sülfirik asit gibi inorganik bileşenleri bulundurmaktadırlar.

CNG kullanılan araçlardan yayılan partikül emisyonları dizel veya çift yakıtlı motorlara göre daha düşük değerler almaktadırlar ve bu değerlerin değişim aralığı 0.01 – 0.07 µm dir. Çoğunlukla 0.02 ve 0.06 µm arasında değerler alır⁽¹³⁾. CNG kullanılan araçlardan kaynaklanan partikül emisyonlarına ait çok az bilgi mevcuttur. Bu konu ile ilgili istisna çalışmalardan birisi Greenwood et. Al (1996) tarafından yapılmıştır⁽¹⁴⁾.

Çizelge 2.3. Dizel motoru egzoz gazlarındaki partiküllerin bileşimi.

Partikül bileşeni	Dizel Egzoz gazındaki partikül emisyon içeriği (ağırlık %)
Katı parçacıklar	66–82
Sıvı yakıt ve organik bileşenleri	11–15
Motor yağı ve organik bileşenleri	9–11
Kükürt bileşenleri ve su	1–11

Dizel motorunda silindir içinde sıvı halde bulunan yakıt damlasının içindeki H₂ molekülleri, hızlı bir şekilde reaksiyona girmekte (oksijenle birleşmekte) ve geriye kalan C, yeterli O₂ bulamadığından yanamayarak is partikülleri halinde dışarı atılmaktadır. İs oluşumunun başlıca nedeni dizel yakıtının silindir içinde yeterli hava bulamaması veya zamanında hızla hava ile karışmaması ve buharlaşmamasıdır.

Bu nedenle dizel motorları her zaman tam yanma için gerekenden daha fazla hava ile çalıştırılırlar. Hava miktarı genellikle 1 kg yakıt için 20 kg'ın altına düşürülmez.

Karbon taneciklerinden oluşan isin doğrudan insan sağlığına bir etkisi henüz tam anlaşılamamıştır. Ancak is partikülleri, yanma odası içerisindeki kanserojen ve tahriş edici etkisi olan yakıt ve yağ moleküllerini de hapsederek insan sağlığını doğrudan tehdit eden bir hale dönüşürler.

- **Kükürt dioksit (SO₂)**

Renksiz, sert kokulu bir gaz olan SO₂, solunum yolları, akciğer ve karaciğer hastalıklarına neden olmaktadır. Ayrıca su buharı ile birleşerek oluşturduğu sülfirik asidin insan sağlığı ve bitki örtüsü üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır.

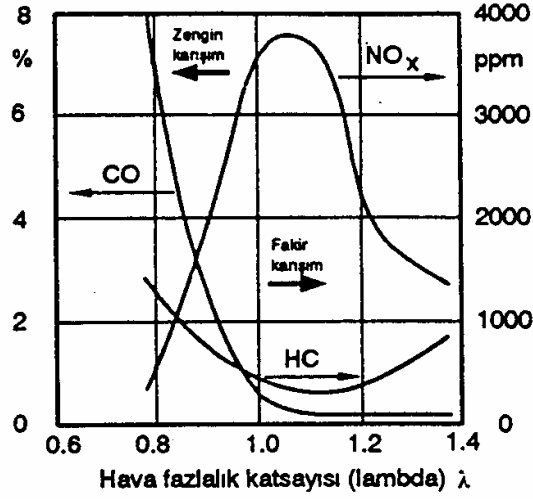
Yakıt içerisinde bulunan kükürt miktarına bağlı olarak, özellikle dizel motorlarında, yanma sonucu kükürdün hava ile birleşmesi ile SO₂ oluşmaktadır. Atmosferdeki su buharının etkisi ile kükürt dioksit sülfirik aside (H₂SO₄) dönüşür ve insan sağlığını olumsuz yönde etkiler.

- **Kurşun bileşikleri (Pb)**

Benzine, yakıtın oktan sayısını artırmak amacıyla eklenen kurşun tetraetil gibi katkı maddeleri, yanma ürünleri arasında kurşun bileşenlerinin de bulunmasına

neden olmaktadır. Bu bileşikler gerek doğrudan gerekse bitkiler üzerinde birikerek buradan doğrudan (yol kenarlarında yetişen bitkisel besinler) veya dolaylı (yol kenarlarında otlayan hayvanların eti ve sütü) olarak tüketilen besinler yolu ile insan vücuduna geçmektedir. Kurşun, zamanla birikerek vücudu etkileyen çok kuvvetli zehirli bir maddedir. Metabolizma ve beyin üzerinde olumsuz etkileri mevcuttur.

Süper benzinin oktan sayısının daha yüksek olması gerektiği için yakıtta daha çok kurşun bileşimi katılmakta ve bu da süper benzinle çalışan motorlarda kurşun emisyonunun artmasına neden olmaktadır. Burada sözü edilen oktan sayısının artışı, benzinin ısı değerini arttırmamakta, fakat yakıtın yüksek sıcaklık ve basınçlar da kendi kendine tutuşma (vuruntu olayı) eğilimini azaltmaktadır. Yani süper benzin daha zor tutuşur. Oktan sayısının artmasıyla birlikte benzin motorlarının sıkıştırma oranı arttırılabilmekte ve bu da motorun verimini iyileştirmekte, yakıt tüketimini düşürmektedir.



Şekil 2.15. Benzin motorlarında HFK'nın egzozdaki kirletici konsantrasyonlarına etkisi.

2.1.9. Havanın Yapısı ve İnsanın Hava Gereksinimi

Bugün ancak okyanus üzerinde veya ıssız alanlarda rastlayabildiğimiz kuru atmosferik havanın hacimsel olarak

- %78 azot (N₂),
- % 21 oksijen (O₂),
- %0.93 argon (Ar),
- % 0.033 karbondioksit (CO₂)'den

oluşturduğu kabul edilebilir.

Erişkin bir insan günde yaklaşık 12 m³ (14.4 kg) hava kullanır. Açlığa 60 gün, susuzluğa 6 gün dayanabildiği halde, havasızlığa 6 dakika dayanamaz. Ancak

uğraşı şekline göre kullanılan hava ve beraberinde oksijen miktarı değişmektedir (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. 68 kg ağırlığında ve akciğeri yaklaşık 150 m² yüzeye sahip olan bir insanın hava gereksinimi

Uğraşı	Solunan hava (lt/dak)
Uyuma, dinlenme	6
Oturma	7
Ayakta durma	8
Yürüme (3 km/saat)	14
(6 km/saat)	26
Hafif beden işi	25-50
İvmeli koşma	43
Ağır beden işi	50-60
Çok ağır beden işi	65-100
Aşırı zorlanma	120-150

İçeride solunan havada oksijen (O₂) miktarı en az % 11, karbondioksit (CO₂) miktarı ise en çok % 3 olabilir.

Oksijen miktarı % 15'in altına düşünce tehlike başlamaktadır. Çalışma halinde ise oksijen alt sınırı % 17- 18 civarındadır.

Normal atmosferden alınan % 21 oksijen ve % 0.033 karbondioksit içeren havanın bileşimi akciğerden çıkarken % 16 - 17 O₂ (oksijeni kullandık) ve % 4 CO₂'ye dönüşmektedir.

Günde 2000 ton 6 numara fuel-oil tüketen Ambarlı Termik Santralının kullandığı hava miktarı ise, 1 kg fuel-oilin yanması için gerekli havanın 14.5 kg olduğu düşünülürse;

$2000 \times 1000 \text{ (kg-yakıt / gün)} \times 14.5 \text{ (kg-hava / kg-yakıt)} = 29.10^6 \text{ kg-hava/gün}$ olacaktır.

Diğer bir deyişle bu santral bir günde 10.5 milyon insanın bir günde tükettiği oksijeni kullanmaktadır.

Benzer biçimde senede 10.000 km yol yapan bir taşıt günde 11 insanın tükettiği oksijeni tüketmektedir.

2.2. Stokiyometrik Oran ve Yanma

Motorlardaki yanma olayına genel olarak, yakıtın oksijenle birleşmesi olarak bakılır. Yakıtın yanması, yakıtın içindeki yanabilen bileşikler ile havanın oksijeni arasında, yüksek hızla oluşan kimyasal reaksiyon sonucudur. Yakıtın yanabilmesi için tutuşma sıcaklığına kadar ısıtılması ve yeterli hava bulunmasıyla, buji ile ateşlenmesi gereklidir.

Bileşimlerindeki su ve kül miktarı ihmal edilirse, yakıtların kimyasal yapısı genel olarak $C_c H_h O_o S_s$ ifadesiyle gösterilebilir. Burada alt indisler, ilgili elementin yakıt içindeki mol kesrini ifade eder. (Gaz fazındaki yakıtlar için, hacimsel kesir manası da vardır.) Böyle bir yakıttaki yanıcı elementler; Karbon (C), Hidrojen (H) ve Kükürt (S)'tür. Azot (N), reaksiyonda nötr kalır. Oksijen (O) ise, oksitleyicidir.

2.2.1. Hava ile Yanma

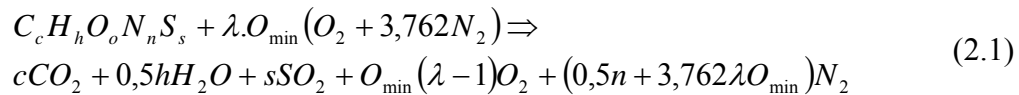
Yanma reaksiyonlarının büyük bir çoğunluğu, yakıtın hava ile yanması şeklinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, reaksiyon denklemleri ve analizlerde diğer

bileşenleri de dikkate almak gerekir. Çizelge 2.5.'de havanın terkiğine ait kütlese analiz sonuçları verilmektedir.

Çizelge 2.5. Kuru havanın elemansel analizi

Gaz	Volümetrik Analiz, %	Mol oranı	Molekül ağırlığı (g/kmol)	Nisbi ağırlık (Kg bileşen) (mol karışım)
O ₂	20,99	0,2099	32,00	6,717
N ₂	78,08	0,7808	28,013	21,875
A	0,93	0,0093	39,948	0,372
CO ₂	0,93	0,0093	44,010	0,013

Havanın bileşenlerinden oksijen haricindekiler, yanma olayında pasiftirler, reaksiyona girmezler. Azot denildiğinde, mol oranları toplamı 79,01 olan nötr gazlar anlaşılmalıdır. O halde; havanın terkiğinde 1 mol oksijene karşılık, 79,01/20,99=3,76 mol seyreltici özellikte nitrojen etkili bileşen vardır. Bu açıklamalara göre, bir yakıtın hava ile yanmasına ait genel reaksiyon denklemi aşağıdaki şekilde verilebilir.



Burada yanma için gerekli molar oksijen miktarı;

$$O_{\min} = (c + 0,25h + s - 0,5o) \text{ kmolO}_2 / \text{kmolY} \quad (2.2)$$

olarak belirlenir.

Karışımın mol ağırlığı;

$$M_k = [M_y + O_{\min} (MO_2 + 3,762MN_2)] / (1 + 4,762O_{\min}) \text{ kg / kmol} \quad (2.3)$$

M_y = Yakıtın mol ağırlığı [kg/kmol]

Hava/yakıt oranı;

$$H / Y = [O_{\min} (O_2 + 3,762N_2)] / M_y \quad (2.4)$$

Stokiyometrik hava/yakıt oranı yakıt kompozisyonuna bağlı olmaktadır. Hava-yakıt karışımı, stokiyometrik hava miktarından daha düşük veya daha fazla hava miktarıyla yakılabilmektedir. Stokiyometrik hava miktarından daha fazla hava kullanıldığı anlamına gelen “artık hava” ile yanma durumunda bu artık hava, reaksiyona girmeden yanma ürünleri içinde kendini gösterir.

Yanma ürünlerinin kompozisyonu, kullanılan hava miktarına bağlı olduğundan ve stokiyometrik hava miktarı da yakıt kompozisyonunun bir fonksiyonu olduğundan, yanma olayının gerçekleştiği gerçek hava/yakıt oranının, stokiyometrik hava/yakıt oranına bölümü, yanma ürünleri kompozisyonunu belirleyen çok önemli bir parametre olmaktadır. Bu parametre, “yakıt fazlalık katsayısı (Φ)” olarak tanımlanır

$$\phi = (y/h)_{\text{gerçek}} / (y/h)_{\text{teorik}} \quad (2.5)$$

Hava fazlalık katsayısı (λ) ise; yakıt fazlalık katsayısının tersine eşittir.

$$\lambda = 1/\phi = (h/y)_{\text{gerçek}} / (h/y)_{\text{teorik}} \quad (2.6)$$

Yakıtça fakir karışımlar için : $\Phi < 1$ veya $\lambda > 1$

Stokiyometrik karışımlar için : $\Phi = 1$ veya $\lambda = 1$

Yakıtça zengin karışımlar için : $\Phi > 1$ veya $\lambda < 1$ olacaktır.

2.3. Benzin ve Benzinli Araçlarda Kullanılan Alternatif Yakıtların Emisyon Üzerine Etkileri

Son yirmi yıla bakıldığında alternatif yakıt arayışlarıyla ilgili yoğun çalışmalar göze çarpmaktadır. Alternatif yakıtlarla ilgili araştırmalar özellikle 1970'lerdeki petrol krizinden sonra yoğunluk kazanmıştır. Ayrıca dünya ham petrol kaynaklarının da sınırlı olması gerçeği bu çalışmaların hızlandırılmasındaki diğer bir etken olarak görülmektedir.

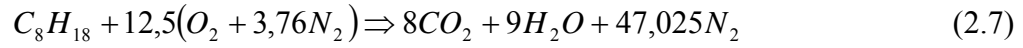
Dünyada yaşanan 1970'lerdeki petrol krizinin unutulmasına rağmen, son yıllarda dünyanın her tarafında alternatif yakıtla çalışabilecek araçlarla ilgili araştırmalar sürdürülmektedir. Bu çalışmalarda, alternatif yakıt kullanımı sonucu egzoz emisyonlarının azalacağı ve hava kalitesinin artabileceği saptanmıştır. Ayrıca 1990 yılındaki temiz hava kanunu değişikliği görüşmesinde kabul edildiği gibi konvansiyonel yakıtlarla karşılaştırıldığında alternatif yakıtlar ozon oluşum miktarını düşürücü bir etkiye sahiptirler.

Bundan dolayı, alternatif yakıtla çalışan araçların geliştirilmesi için yakın dönem çalışmalarda hava kalitesinin iyileştirilmesi amaç olmuştur. Uzun dönem çalışmalar için ise birçok sebep vardır. Bunlardan en önemlisi, petrol rezervlerinin sınırlı oluşudur. Yapılan çalışmalardan ham petrol rezervlerinin 30-40 yıllık ömrünün kaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca başta Ortadoğu olmak üzere petrol üreticisi ülkelerde son yıllarda olan olaylar da göze çarpmaktadır.

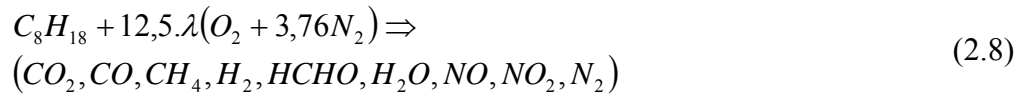
2.3.1. Benzinden kaynaklanan emisyonlar

Klasik benzin motorunda benzin ile hava, motor silindiri dışında, karbüratör adı verilen bir aygıtta karıştırılmakta ve sonra silindirlere sevk edilmektedir. Yeni motorlarda, karbüratör yerine enjektör bulunmaktadır. Emme manifoldundan silindirlere akan hava içerisine yapılan püskürtme ile gerekli hava-yakıt karışımı sağlanmış olur.

1 kg yakıtta, stokiyometrik oranda takriben 15 kg hava katılan bu karışım, silindirler içerisinde yakılarak gerekli güç elde edilmektedir. Bütün kirleticiler, yanma olayına bağlı olarak ortaya çıkmaktadırlar. Benzin, izo-oktana benzetilecek olursa teorik yanma halinde, yanma ürünleri aşağıdaki denklemde görüldüğü gibidir.



Ancak, bu denklemde inert olarak kabul edilen N_2 , yüksek sıcaklıkta O_2 ile reaksiyona girerek, NO_x emisyonlarını oluşturmaktadır. Benzin içindeki kükürt miktarı, benzin motorundaki SO_x miktarını belirler. Çünkü kükürt bileşeni, yanma olayında O_2 ile hemen reaksiyona girmektedir. Geri kalan O_2 , diğer bileşenleri oksitleyebilmektedir. Ayrıca, benzin motorunda işletme şartları sık sık değişmekte ve bazı hallerde veya bölgelerde hava-yakıt oranı, teorik oranın altına düşmektedir. Bunun sonucu olarak, azot oksitlerin NO_x yanı sıra, eksik yanma ürünleri de, egzoz gazlarının içinde oluşmaktadır.



Motorun silindiri içerisinde bir miktar yakıt, reaksiyonlar sonucu parçalanmakta ve tanı olarak yanmadan atmosfere atılmaktadır. Bunların hiç okside

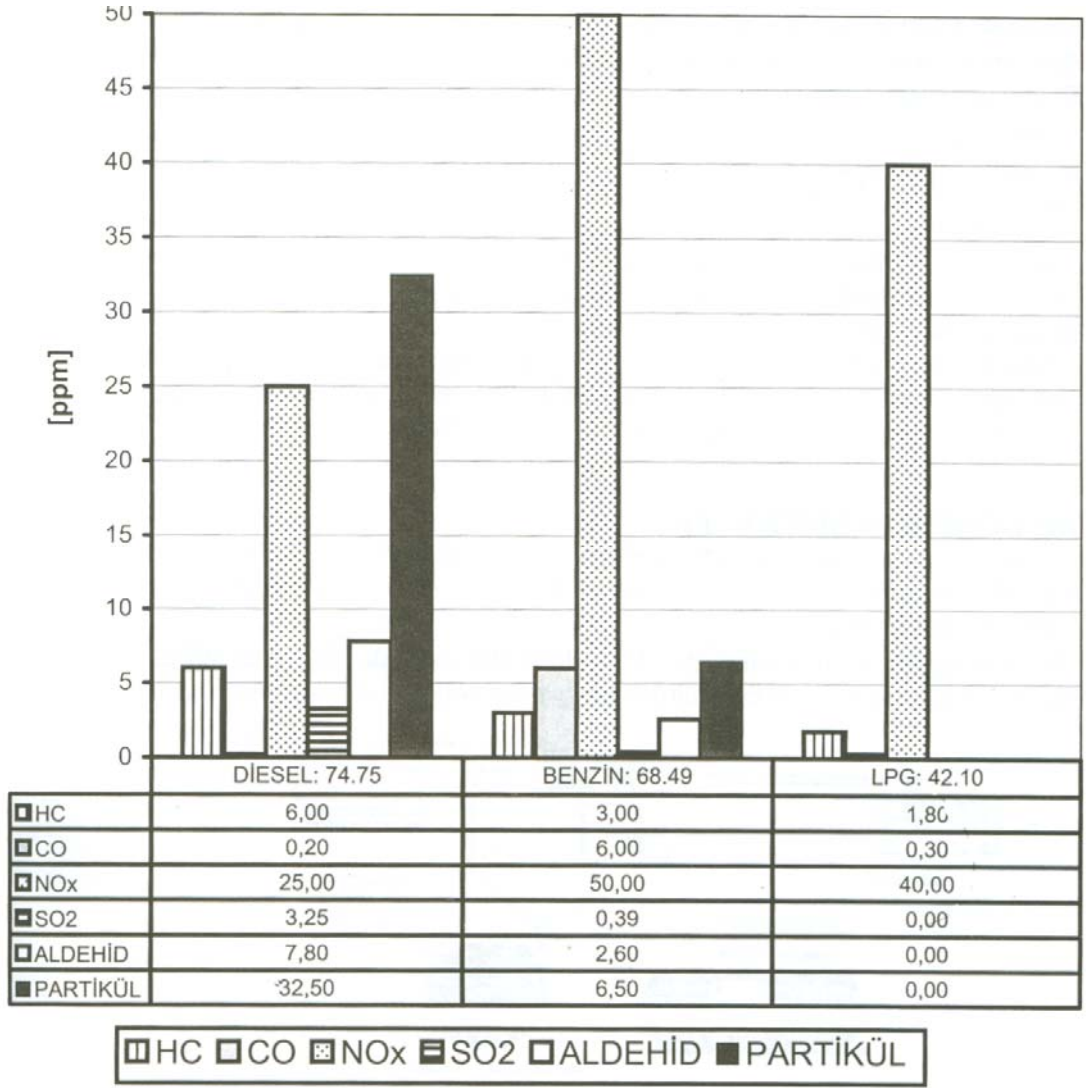
olmayanlarına hidrokarbon (HC) denilmektedir.(CH₄, C₃H₈, C₄H₁₀ vb.) Okside olan bazı molekül tipleri, aldehitlerdir.(R.CHO) Örnek olarak, formaldehit (H.CHO) söylenebilir.

Benzin-hava karışımı silindir içerisine emildikten sonra, 1/8-1/9 arasında olacak şekilde, piston tarafından sıkıştırılmakta ve buji yardımıyla tutuşturulmaktadır. Karışımın kendi kendine tutuşması ve bunun sonucunda oluşan vuruntudan kaçınmak için benzine, oktan sayısını artıran bazı bileşikler katılır. Halen bilinen, oktan sayısını artırmak için benzin içine katılan, en basit ve en ucuz yöntem olarak, kurşun tetra etil gösterilebilir. Kurşunsuz benzin kullanımına yönelmenin amacı; motorlarda üretilen kurşun emisyonunun yok edilmesi ve katalitik konvertör kullanımının gerçekleştirilmesidir.

2.3.2. LPG'den kaynaklanan emisyonlar

Yanma olayı kaçınılmaz olarak kirleticidir. Yanma sonucu oluşan emisyonlar yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerine, yakıcı/yakıt karışımının bileşimine, ayrıca yanma sürecine ve çevre şartlarına bağlıdır.

Benzin, kurşunsuz yakıt dizel ve LPG emisyonlarını karşılaştıracak olursak tüm bu yakıtların karbon ve azot monoksitlerle birlikte yanmamış hidrokarbonlar ürettiğini, ancak kurşunun yalnızca benzin tarafından açığa çıkarıldığını görürüz. Bundan başka, LPG kükürt dioksit ve aromatikleri üretmez (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Araç yakıtlarının yüzde kirletici miktarı ⁽¹⁵⁾.

Yanma olayında ortaya çıkan tüm ürünler havanın kalitesi üzerinde kötü etki yapar. Ayrıca mutlak madde miktarlarından daha önemli olan, her bileşiğin zehirlilik derecelerinin bilinmesi ve gerçek zararlılık ölçülerinin tanımlanmasıdır.

Çizelge 2.6. Egzoz emisyon kirleticilerinin CO'ya göre gerçek zarar verme değerleri⁽¹⁵⁾.

Bileşik	Zehirlilik Parametresi
CO Karbonmonoksit	1
HC Yanmamış Hidrokarbon	60
NO_x Azotmonoksit	100
IPA ve aldehit	130
SO₂ Kükürtdioksit	130

Yukarıdaki çizelgeden görüleceği gibi, yanmada daha zehirli ürünler olan kükürt dioksit ve kurşun, LPG'de bulunmamaktadır. Ayrıca, LPG'nin yanmasında oluşan yanmamış hidrokarbonlar da, LPG'de katkı ve aromatikler olmadığı için, diğer yakıtlara oranla daha az zehirlidir.

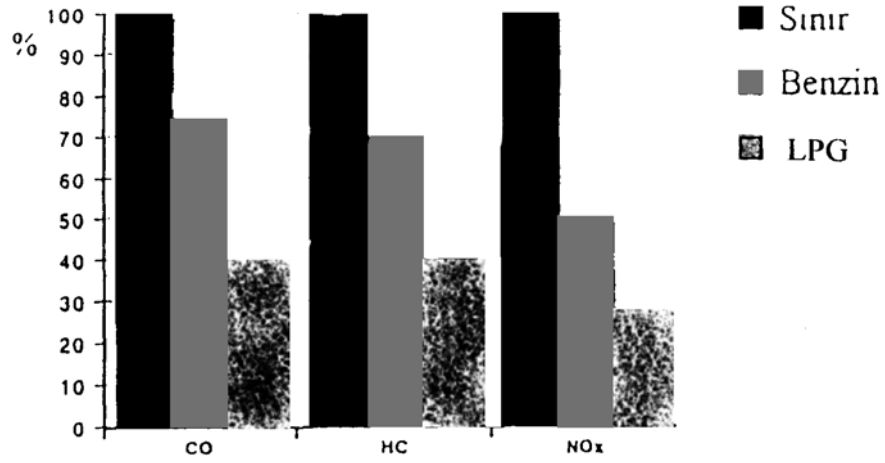
Aşağıdaki nedenlerden dolayı LPG'nin daha az kirletici olduğunun altı çizilmelidir:

- Yanma olayı gaz halinde oluşur, LPG bir gaz olduğundan, bu sürece daha uygun olup, daha homojen ve içinde kömür parçacıkları bulunmayan bir karışımın garantisidir,
- Yüksek termodinamik özellikleri daha kolay ve iyi yanma sağlar,
- Kurşun, kükürt ve aromatikler gibi katkıları içermez ve bunların emisyonu yoktur^(15,16).

Doğal bir yakıt olan LPG çevreye olumsuz etkileri olmasına rağmen benzine oranla daha az kirletici veya doğa dostu bir yakıttır. Ayrıca benzinde bulunan her türlü katkı maddeleri de bulundurmadığı için bunlardan kaynaklanan çevre kirliliğine neden olmaz. Ancak işlemi sonunda ortaya çıkan yanmamış HC, CO ve NO_x vb. atık gazlar benzinde olduğu gibi LPG'de söz konusudur.

- Hatalı ve eksik malzemeden yapılmış dönüşümler,
- Eksik veya yanlış bakım yapılması,
- Düşük maliyet nedeni ile hava yakıt ayarının yapılması veya zengin karışım ayarında kullanmak gibi durumlarda LPG'nin çevreye verdiği emisyonlar daha zararlıdır.

Kapalı devre ikinci kuşak LPG sistemlerinde elektronik kumanda modülü yardımı ile emisyon değerleri çok düşük seviyelere indirilebilmektedir. Ancak orijinalinde benzin püskürtme sistemi ve katalitik konvertör bulunan taşıtlarda LPG ile sağlanan emisyon avantajı oransal olarak karbüratörlü taşıtlara göre daha az kalmaktadır⁽¹⁶⁾.



Şekil 2.17. Katalizörlü araçlarda benzin ve LPG'nin emisyon değerleri ⁽¹⁷⁾.

2.3.3. CNG'den kaynaklanan emisyonlar

Doğalgaz en az kirletici yayan yakıtlardan biridir. Doğalgaz hafif ve orta hizmet taşıt filolarında, taksiler gibi ve dağıtım kamyonlarında kullanıldığında, ozon oluşturan kimyasallar emisyonunu önemli düzeyde düşürme potansiyeline sahiptir.

Doğalgaz yakıt sistemleri tamamen yalıtılmıştır ve dolun sırasında hiçbir şey yaymazlar. Oysa ki benzinin doldurma sırasındaki buharlaşmasıyla önemli miktarda ozon oluşturan kimyasal çıkmaktadır.

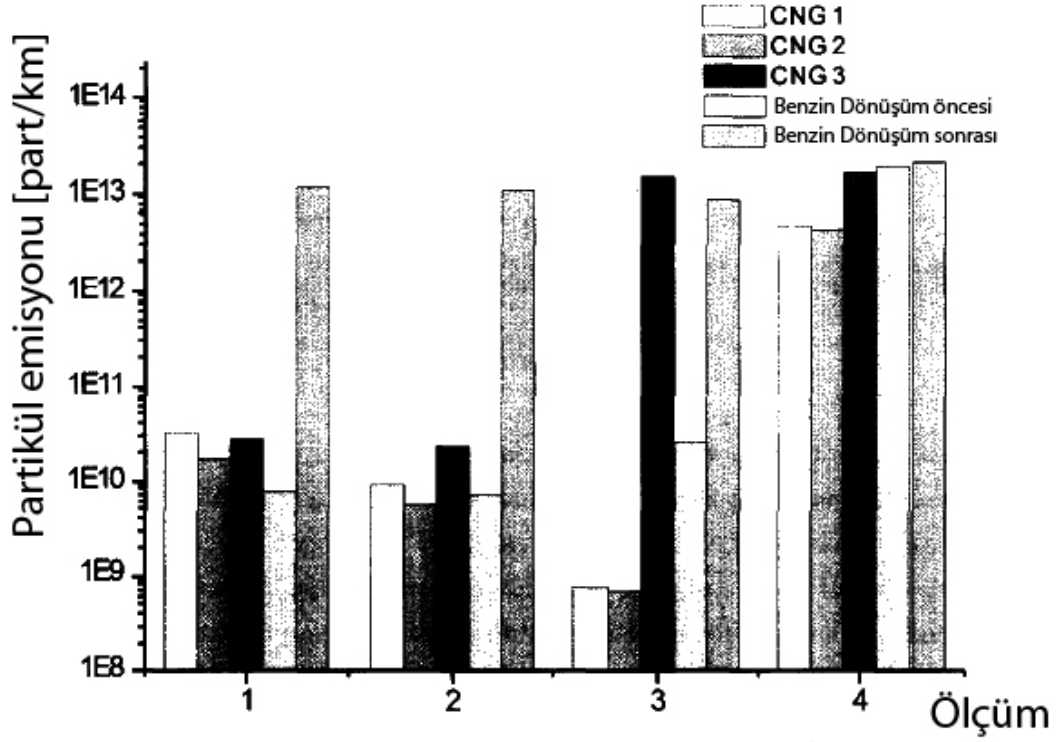
Egzoz emisyonları, henüz yasal zorunluluğu bulunmayan Ultra Düşük Emisyonlu Taşıt (ULEV) standardının çok altındadır.

Doğalgazlı taşıtların çoğu Super Ultra Düşük Emisyonlu Taşıt (SULEV) standardını karşılamakta ve üretilen güç başına emisyonlar dikkate alındığında elektrikli taşıtlardan bile temiz bulunmaktadırlar.

CNG kullanılan araçlardan yayılan partikül emisyonları dizel veya çift yakıtlı motorlara göre daha düşük değerler almaktadırlar ve bu değerlerin değişim aralığı 0.01 – 0.07 µm dir. Çoğunlukla 0.02 ve 0.06 µm arasında değerler alır⁽¹⁸⁾.

CNG ile çalışan araçlardan kaynaklanan emisyonların benzin ile çalışan araçlardan kaynaklanan emisyonlardan daha düşük değerler alacağı genel bir kabuldür ve dönüşüm sonrası daha düşük olacağı beklenebilir. Özellikle iki nokta üzerine dikkat edilmelidir. Birincisi araçların benzin ile çalışacak şekilde dizayn edilmiş olmaları ve bu araçlarda dizayn sonrası performanslarının dikkat edilmeyen noktalar nedeniyle eskisi gibi olmayabileceğidir. İkinci olarak, dönüşüm sonrasında benzin ve CNG yakıtlarının sık sık değişken olarak kullanılacağıdır. Böylece, genel olarak dönüşüm sonrası oluşacak emisyon seviyelerini etkileyecektir ve aynı

zamanda sık sık yakıt değişiminin etkilerinin asıl dönüşüm gereklerinin üzerine etkilerinin incelenmesini gerektirir⁽¹⁹⁾.

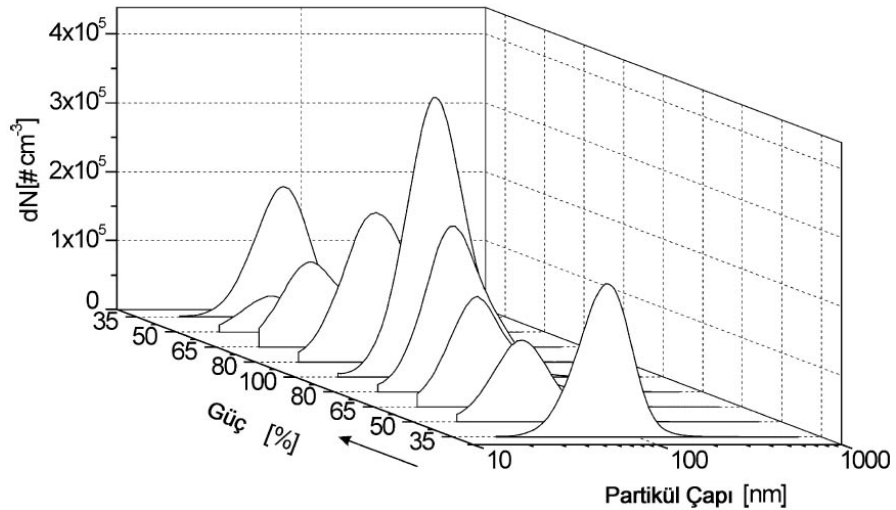


Şekil 2.18. Partikül emisyonlarının kat edilen mesafeye göre değişimi⁽¹⁸⁾.

İçten yanmalı motorlar için yapılmış olan emisyon düzenlemeleri yalnızca toplam partikül kütlesi emisyonuna göre düzenlenmiştir; atmosfere verilen partiküllerin boyutu veya partikül sayısı konsantrasyonu ile ilgili bir düzenleme yapılmamıştır. Güncel düzenlemelere uygun olarak araç ve motor üreticileri dizaynlarını toplam partikül emisyonunu azaltacak şekilde gerçekleştirmektedir. Yapılan dizayna bağlı olarak NO_x ve CO emisyonu seviyeleri belirgin bir şekilde azalmaktadır⁽¹³⁾.

Belirtilen emisyonlarda gerçekleşen indirgemelere rağmen, güncel düzenlemelere bağlı olarak dizayn edilmiş olan araçlarda partikül sayısında artışa neden olmaktadır. Özellikle $0.1\mu\text{m}$ 'nin aşağısındaki çok ince partiküllerin sayısının artmasına neden olmaktadır⁽²⁰⁾.

Yapılmış olan egzoz emisyonları analizlerinde atmosfere atılan toplam partikül sayısı ve partiküllerin karakterine dikkat edilmek zorundadır. Gözlenmiş olan partiküllerin boyutlarının dağılımı çoğunlukla unimodal ve lognormal dağılıma uymaktadır. Bu yüzden ortalama çap değeri seçilmiş olan partikül boyutunu ve boyutsal dağılım değişimini göstermektedir. Şekilde ok ile belirtilen yönde güç artırılmakta ve daha sonrasında azaltılmaktadır. Daha küçük boyutların belirgin olduğu değer aralığı % 35 – 50 değerleri arasındadır. Bu azalmanın sebebi partikül çaplarının ölçüm cihazının ölçüm aralığından dolayı belirli bir partikül miktarının ölçülememesinden kaynaklanmaktadır⁽¹³⁾.



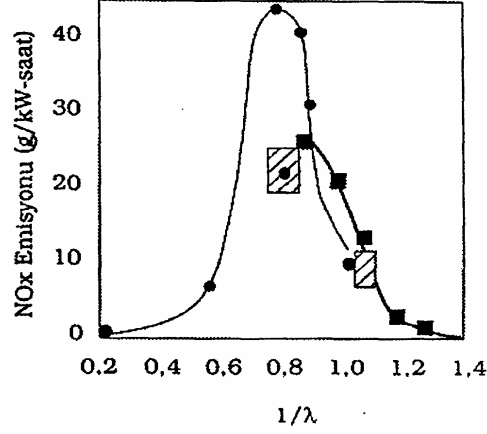
Şekil 2.19. Farklı yükleme koşullarında oluşan partikül boyutu dağılımı.

2.3.4. Hidrojenden kaynaklanan emisyonlar

Alternatif yakıt olarak hidrojen kullanıldığında, sıvı yakıt kullanımı ile özdeşleşmiş olan buhar tıkaçı, soğuk duvarda soğuma, yetersiz buharlaşma, fakir karışım ve bunlara bağlı olarak oluşacak etkiler görülmez. Hidrojen kullanımının diğer bir belirleyici faktörü de günümüz koşullarında en temiz yakıt olmasıdır. Hidrojen hava karışımı yandığı zaman, ana yanma ürünü sudur⁽²¹⁾.

İçten yanmalı motorlarda ortaya çıkan kirletici egzoz gazları arasında genellikle azot oksitler, karbon monoksit ve hidrokarbonlar bulunur. Ancak hidrojenin hava ile yanması sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeniyle yanma ürünleri arasında CO₂ ve HC mevcut olmayacak, sadece motorun yağlama yağının yanması nedeniyle oluşan HC'lar egzoz gazları arasında bulunacaktır. Diğer yandan bu motorlarda, yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler bol miktarda üretilmektedir. Üretilen azot oksitlerin büyük bölümünü oluşturan NO'lar egzoz sistemi içerisinde veya atmosfere çıktıktan sonra NO₂'ye dönüşmektedir⁽²²⁾.

NO genelde hava fazlalık katsayısının ve karışımın yerel sıcaklığının bir fonksiyonu olarak üretilmektedir. Bu nedenle zengin ($\lambda < 0.9$) ve fakir karışımlarda NO emisyonu önemli ölçüde azalacaktır. Hidrojen yakıtlı motorların fakir karışımlarla çalışma özelliği bu konuda önemli yararlar sağlamaktadır.



Şekil 2.20. NO emisyonları.

Hidrojen yakıtlı motorlarda egzoz gazları içerisinde hava kirliliğini etkileyecek ürün olarak bulunan NO_x'lerin miktarı, yanma odası sıcaklıklarının azaltılması oksijen konsantrasyonunun azaltılması, veya yanma süresinin kısaltılması sonucu düşürülebilmektedir. Bu amaçla egzoz gazları resirkülasyonu, emme manifolduna su püskürtülmesi, ateşleme zamanının geciktirilmesi gibi yöntemler kullanılmaktadır. İnert egzoz gazlarının resirkülasyonu sonucu, özellikle fakir karışımlarda oksijen konsantrasyonu düşürüldüğü için etkin bir şekilde NO_x azaltılmaktadır. Ancak bu durumda motorun gücü de bir miktar düşmektedir.

Motorun emme manifolduna su püskürtülmesi sonucunda karışım sıcaklığı düşmekte, yanma hızı azalmakta ve sonuç olarak NO emisyonu da azalmaktadır. Ateşleme zamanının geciktirilmesi de motorun termik veriminden bazı kayıplara neden olmakla beraber, maksimum sıcaklıkları düşürmekte ve dolayısıyla da NO_x emisyonunu azaltmaktadır.

Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi de NO_x emisyonunu azaltıcı yönde etki etmektedir. Bu durumda püskürtme zamanının etkileri de önem

kazanmaktadır. Ayrıca yanma odası şekli ve motorun sıkıştırma oranı da hava hareketlerinin oluşturulması ve ulaşılan sıcaklıklar açısından NO_x emisyonu üzerinde etkin olmaktadır⁽²²⁾.

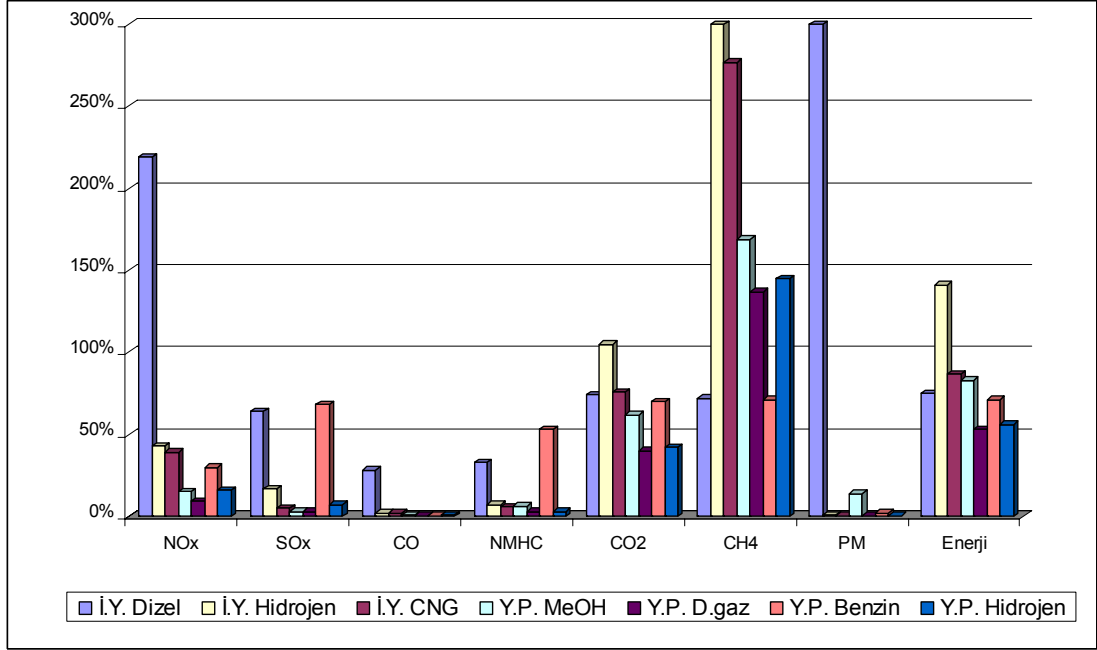
2.3.5. Yakıt pillerinden kaynaklanan emisyonlar

Güç üretimi ve ulaşım sektöründe kullanılan teknolojinin daha az emisyon yayacak şekilde geliştirilmesi ve çok geniş bir aralığa sahip yeni teknolojilerin araştırılması gerekmektedir. Yakıt pilleri bu bakımdan önemli bir miktarda vaatte bulunmaktadır. Çünkü yakıt pilleri, elektrokimyasal enerji dönüşüm birimleridir, çok az miktarda yayarlar yada hiç emisyon ürünü yaymazlar ve çok daha yüksek verimlere çıkabilirler. Ancak, teknolojinin çevresel değerlendirilmesine karar verebilmek için son kullanıcı tarafından kullanım sürecindeki karakteristiklerinin elde edilmesi yeterli olmamaktadır. Bu nedenle teknolojinin çevresel performansının değerlendirilmesinde üretimden tüketime geçen sürecin dikkate alınması daha düzgün sonuçlar vermektedir⁽²³⁾.

Değerlendirmesi yapılan çalışmalar incelendiğinde, yakıt pillerinden kaynaklanan emisyon değerlerinin indirgenmesi ve temel enerji tüketimi değerleri göz önüne alınarak diğer sistemler ile karşılaştırması yapılmıştır. Temel yakıt çevrimi üzerine kurulu olan bu karşılaştırmalarda karşılaştırması yapılan emisyon ve enerji tüketim değerleri analiz edilmiştir.

NO_x, SO_x, CO, metan içermeyen hidrokarbonlar (NMHC), partikül madde (PM), CO₂, ve metan emisyonları dikkate alınmıştır. Ek olarak her bir sistemin temel enerji kullanım değerleri de eklenmiştir⁽²⁴⁾.

Sera etkisi yapan gazların haricindeki diğer kirletici emisyonlar bütün test araçları için daha düşük değerler almıştır (Çizelge 2.7)(Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Otomobillere bağlı temel enerji kullanımı ve toplam sistem emisyonları

Çizelge 2.7. Otomobillere bağlı temel enerji kullanımı ve toplam sistem emisyonları

Uygulama		NOx (g/km)	SOx (g/km)	CO (g/km)	NMHC (g/km)	CO2 (g/km)	CH4 (g/km)	PM (g/km)	Enerji
İ.Y. Benzin	Mutlak değer	0.26	0.2	2.3	0.77	209	0.042	0.01	3.16
İ.Y. Dizel	Mutlak değer	0.57	0.13	0.65	0.25	154	0.03	0.05	2.36
	Benzin Eşd.	219%	64%	28%	33%	74%	72%	489%	75%
İ.Y. CNG	Mutlak değer	0.1	0.01	0.05	0.05	158	0.12	0.0001	2.74
	Benzin Eşd.	39%	5%	2%	6%	76%	277%	0.50%	87%
İ.Y. Hidrojen	Mutlak değer	0.11	0.03	0.04	0.05	220	0.15	0.0001	4.44
	Benzin Eşd.	43%	17%	2%	7%	105%	364%	1%	141%
Y.P. MeOH	Mutlak değer	0.04	0.006	0.014	0.047	130	0.072	0.0015	2.63
	Benzin Eşd.	15%	3%	0.60%	6.10%	62%	169%	14%	83%
Y.P. D.gaz	Mutlak değer	0.024	0.0063	0.0074	0.019	83	0.059	0.0001	1.69
	Benzin Eşd.	9%	3%	0.30%	3%	40%	137%	0.50%	53%
Y.P. Benzin	Mutlak değer	0.08	0.13	0.01	0.41	147	0.03	0.0002	2.24
	Benzin Eşd.	30%	68%	0.40%	53%	70%	71%	2%	71%
Y.P. Hidrojen	Mutlak değer	0.04	0.01	0.02	0.02	87.6	0.06	0.0001	1.77
	Benzin Eşd.	16%	7%	1%	3%	42%	145%	0.50%	56%

3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

İçten yanmalı motorların her geçen gün artışına bağlı olarak artan emisyon değerleri yeni sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Bu sınırlamalara bağlı olarak geliŐtirilmekte olan ve kullanım halindeki araçlardan yayılan emisyon değerlerinin belirlenmesi önemli bir hale gelmiştir. Bu noktada bilimsel çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada alternatif yakıtların benzinli motorlarda kullanımının egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiŐ ve yapılmış olan bilimsel çalışmalar karşılaŐtırılmalı olarak değerlendirilmiştir.

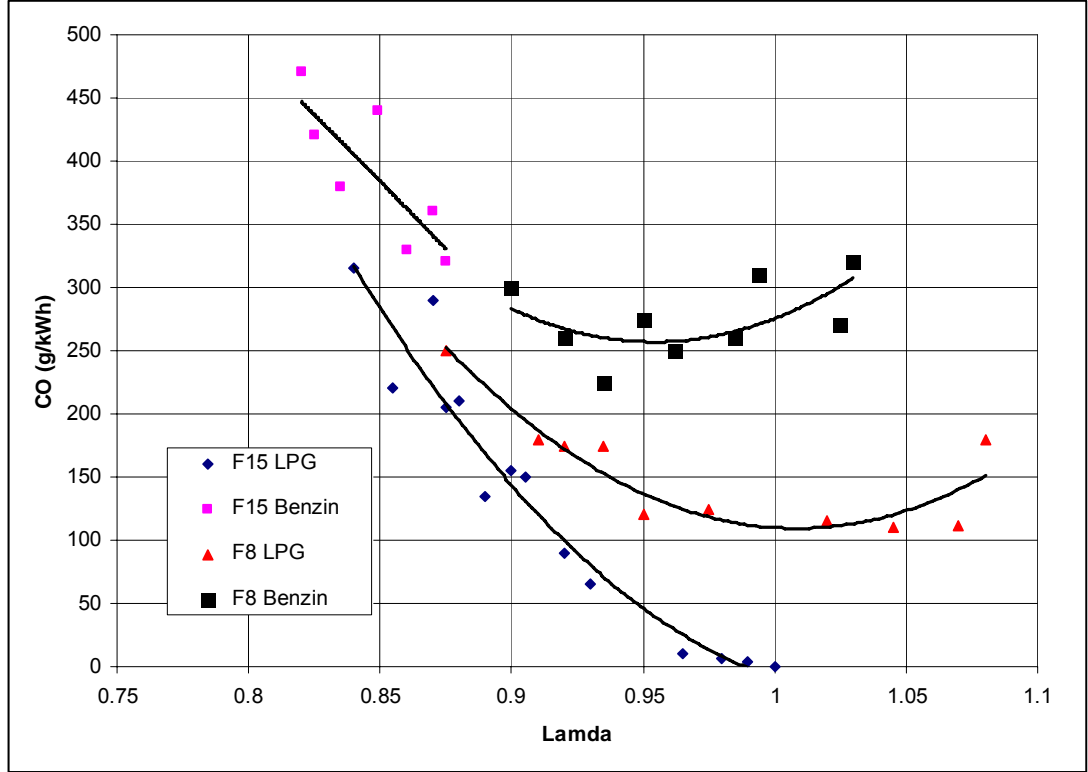
3.1. LPG Kullanılan Araçlardaki Emisyon Bulguları

AŞağıdaki özelliklere sahip iki farklı deney motorunda benzin ve alternatif yakıt olarak LPG kullanılmıştır. Yapılmış olan deneylere ait sonuçlar aşağıdaki gibidir⁽²⁵⁾.

Çizelge 3.1. Deney motorlarının ana özellikleri

	F15	F8
Motor tipi	4 zamanlı	4 zamanlı
Model	Yamaha F15 AMHL	Yamaha F 8 BHML
Gücü ve bu güçteki devir sayısı	11 kW 5000 rpm	5,9 kW 550 rpm
D/H	59/59	59/42
Silindir sayısı	2	2
Sıkıştırma oranı	9,19	9,30
Hacmi (cm³)	323	232

- CO emisyonu

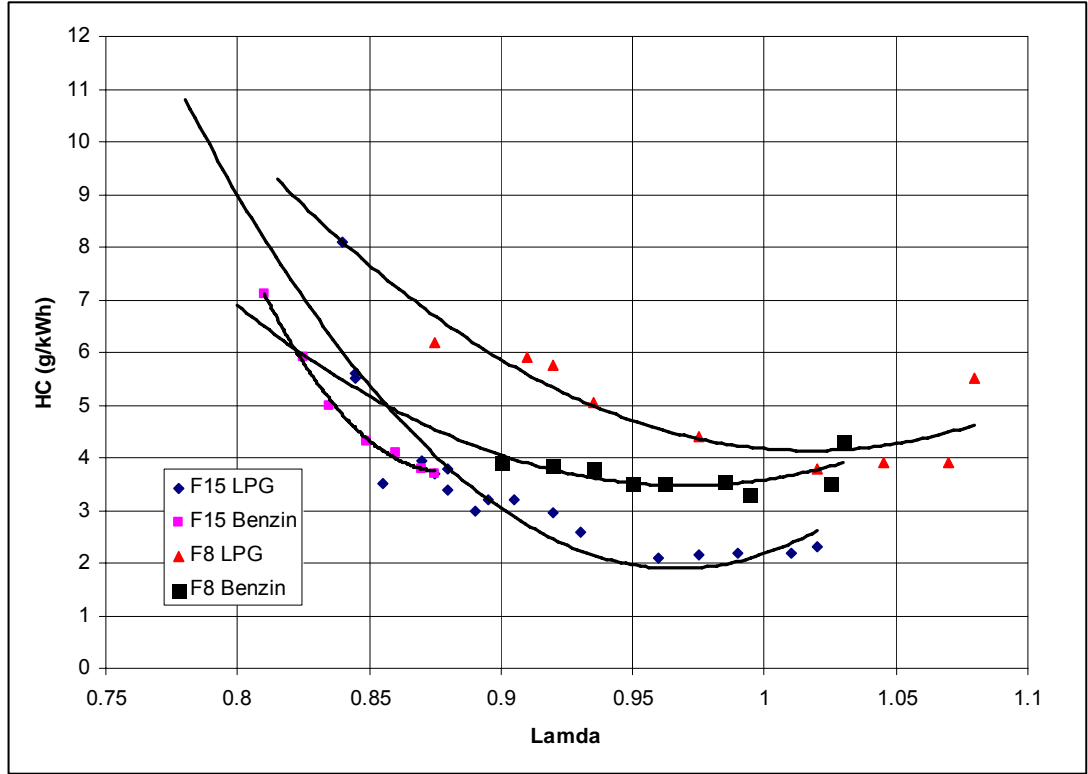


Şekil 3.1. Benzin ve LPG için CO karşılaştırması

CO emisyonu hava fazlalık katsayısına bağlıdır. Şekilde de bu bağımlılık açıkça görülmektedir. CO emisyonunun hava fazlalık katsayısına bağımlılığının yanında, yakıt tipine olan bağımlılığı da açıkça görülmektedir. Aynı HFK değerinde LPG den elde edilen CO emisyonu değerleri daha düşük olmaktadır. Bu olay gaz yakıtların daha iyi karışım sağlayabilmesinden dolayı ve silindirlerin birbirlerine olan benzerliklerinin artmasından dolayıdır. Ayrıca F8 motorunun LPG deki CO emisyonunun biraz düşme eğilimi göstermesi daha büyük yanma odası yüzeyinden

dolayı hacimsel oranının yüksek olması ve böylece nispeten daha soğuk hava dolgusunun olması, alev sıcaklığını düşürmesidir.

- **HC emisyonu**

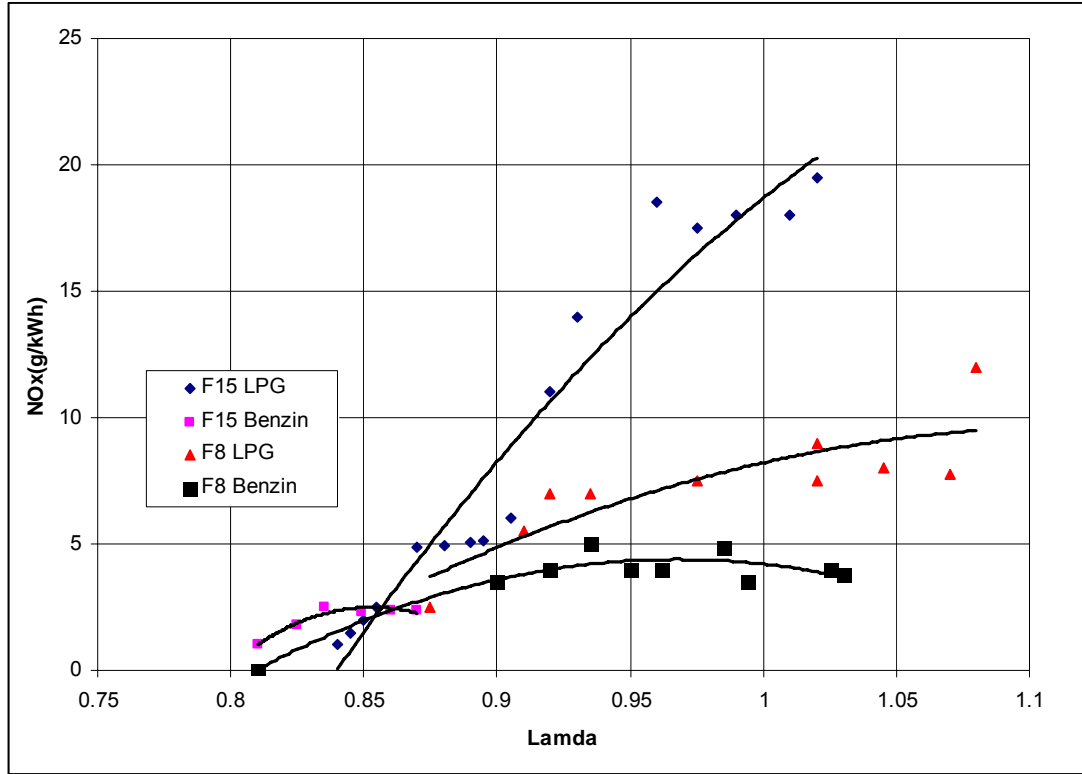


Şekil 3.2. Benzin ve LPG için HC karşılaştırması

Hidrokarbon emisyonunun oluşumu eksik yanma olayına bağlıdır. Ölçüm yapılmış olan motorlarda LPG den kaynaklanan HC emisyonlarında bir paralellik göze çarpmaktadır. LPG ve Benzin kullanımı sonucu elde edilen HC değerleri karşılaştırıldığında ise çok fazla bir farklılık görülmemektedir. Bunun nedeni, motor tasarımının kontrol karakteristiklerinden, dağıtım düzenlenmesi ve yanma odası dizaynındaki kesim hükümlerden kaynaklanabilir.

Gerçekte, daha uzun valf zamanlaması düşük hızlardaki daha yüksek HC oranına neden olmaktadır ve LPG emisyonları benzine oranla düşük hızlarda daha fazla olmaktadır. Bu sonuç benzin damlacıklarının daha yüksek ataletle sahip olmaları ve bu damlacıkların daha zor hava ile karışmaları olabilir. Daha yüksek motor hızlarında, LPG den kaynaklanan HC emisyonları aynı motor için benzinde daha düşüktür.

- **NO_x Emisyonu**



Şekil 3.3. Benzin ve LPG için NO_x karşılaştırması

NO_x atmosfer içerisinde bulunan azota bağımlıdır. NO_x oluşumu için çok yüksek sıcaklıklar gerekmektedir. NO_x oluşumu için ayrıca oksijende gereklidir.

Sonuç olarak yüksek sıcaklıklar ve yüksek oksijen konsantrasyonu daha fazla NO_x oluşumuna neden olmaktadır. Silindir içerisindeki NO_x oluşumu ekivalans oranının 0.90 ve 1.05 değerleri arasında artmaktadır. Daha adyabatik bir yanma çevrimine sahip olan LPG'nin yanması sonucu daha yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Nedeni ise LPG'nin daha yüksek yanma hızına sahip olması ve ortamdaki dolguyu soğutmamasıdır, benzin dolgu içerisinde buharlaşmak zorundadır. F15 motoru daha fazla NO_x oluşumuna neden olmaktadır.

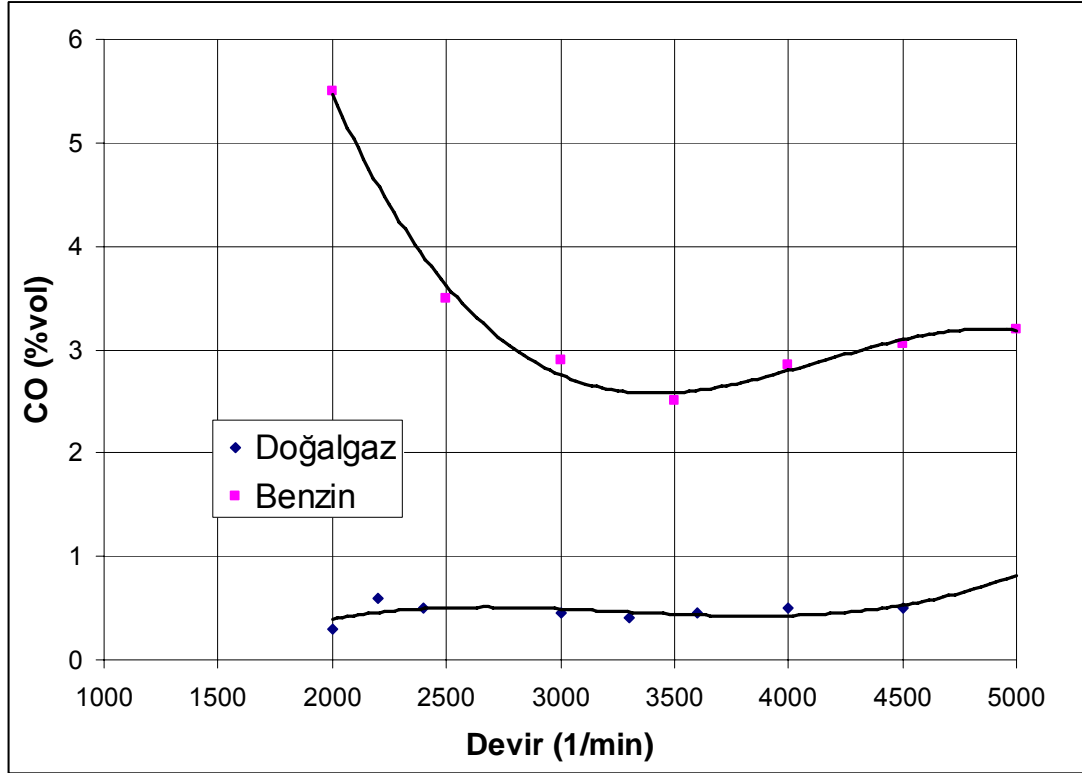
3.2. CNG Kullanılan Araçlardaki Emisyon Bulguları

Aşağıda alternatif yakıt olarak CNG'nin kullanıldığı Murat 124 marka buji ateşlemeli, dört zamanlı bir motor kullanılarak; doğalgazın emisyon etkisi değerlendirilmiştir. Motorun sıkıştırma oranını artırmak ve daha yüksek verim almak düşüncesiyle, motorun silindir kapağından motor kataloğunda müsaade edilen maksimum miktar olan 1 mm talaş kaldırılarak sıkıştırma oranında 0,9/1 kadar artış sağlanmıştır⁽²⁶⁾.

Doğalgazla çalışma sırasında ölçülen bütün emisyon değerleri, benzinle çalışmada ölçülen değerlerin altında kalmıştır. Özellikle CO, HC emisyonlarında önemli ölçüde azalma görülmüştür.

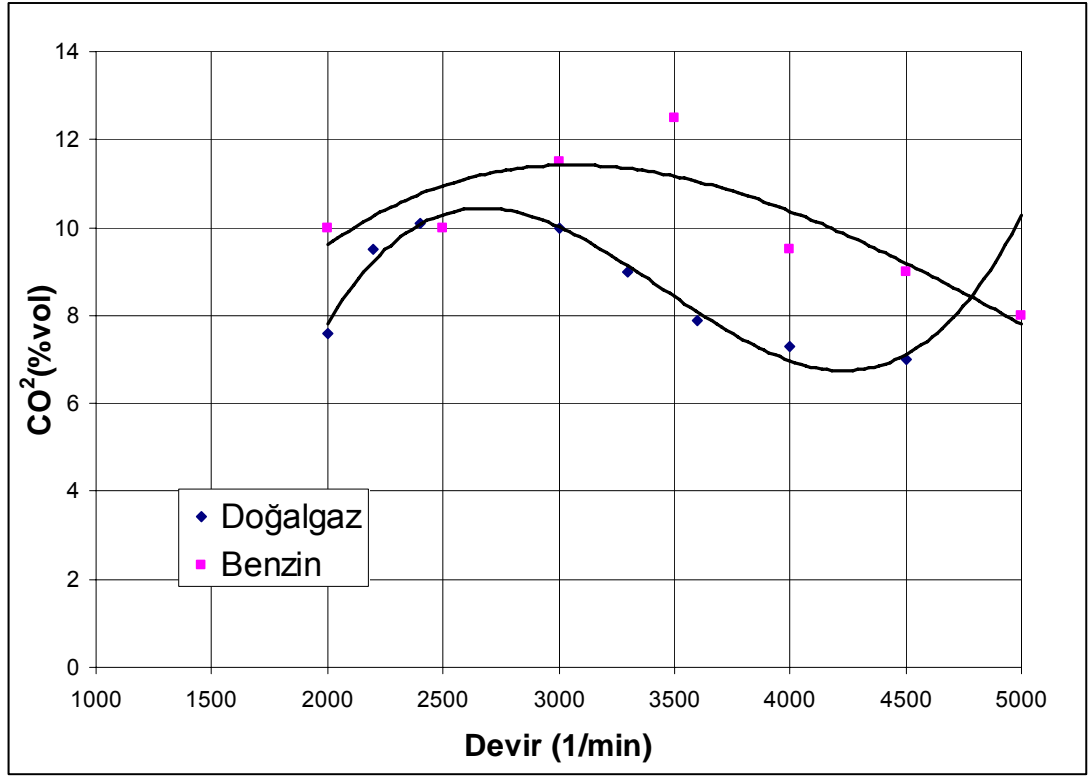
Doğalgaz ve benzinle çalışmada elde edilen CO emisyonu eğrileri Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Bütün devir sayılarında elde edilen CO değerlerinin, doğalgazla yapılan çalışmada, benzinle yapılan çalışmada elde edilen değerlere oranla düşük olduğu tespit edilmiştir. Minimum CO emisyonu, hacimsel olarak doğalgazla çalışmada 2000 l/dak'de %0,24, benzinle çalışmada 3500 l/dak'de %2,42 olmuştur.

Doğalgazla çalışmanın ortalama CO emisyon değerleri, benzinle çalışmanın yaklaşık % 17'si kadar olmuştur.



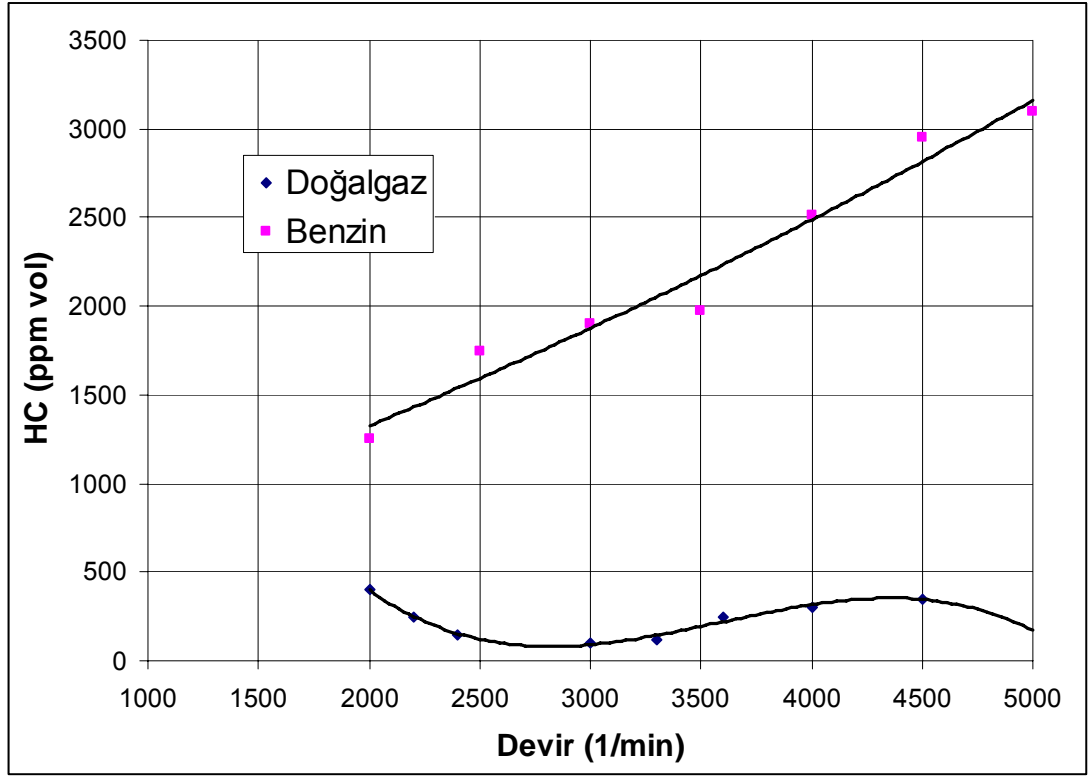
Şekil 3.4. CNG ve benzin için CO kıyaslaması

Doğalgaz ve benzinle çalışmada elde edilen CO₂ emisyonu eğrileri Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Bütün devir sayılarında elde edilen CO₂ değerlerinin, doğalgazla yapılan çalışmada, benzinle yapılan çalışmadan elde edilen değerlere oranla düşük olduğu görülmüştür. Minimum CO₂ emisyonu hacimsel olarak, doğalgazla çalışmada 4500 l/dak'de % 7,01, benzinle çalışmada 5000 l/dak'de % 8,32 olmuştur. Doğalgazla çalışmanın ortalama CO₂ emisyon değerleri, benzinle çalışmanın yaklaşık % 90'ı kadar olmuştur.



Şekil 3.5. CNG ve benzin için CO₂ kıyaslaması

Doğalgaz ve benzinle çalışmada elde edilen HC emisyonu eğrileri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bütün devir sayılarında elde edilen HC değerlerinin, doğalgazla yapılan çalışmada, benzinle yapılan çalışmadan elde edilen değerlere oranla oldukça düşük olduğu görülmüştür. Minimum HC emisyonu hacimsel olarak, doğalgazla çalışmada 3000 1/dak'de 39 ppm, benzinle çalışmada 2000 1/dak'de 1200 ppm olmuştur. Doğalgazla çalışmanın ortalama HC emisyon değerleri, benzinle çalışmanın yaklaşık % 12'si kadar olmuştur.

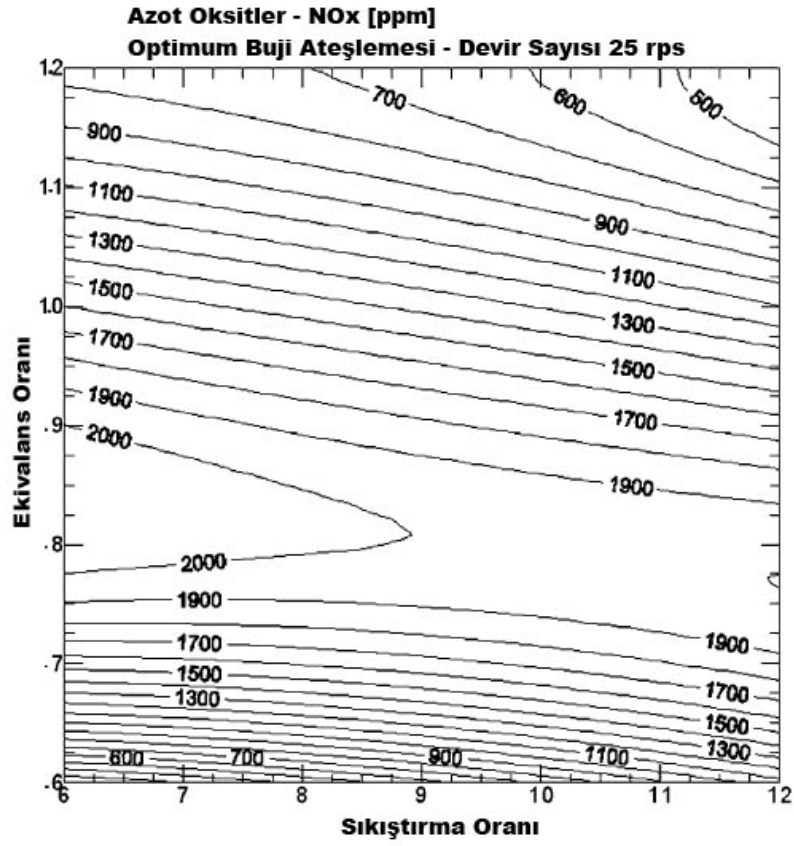


Şekil 3.6. CNG ve benzin için HC kıyaslaması

3.3. Hidrojen Kullanılan Araçlardaki Emisyon Bulguları

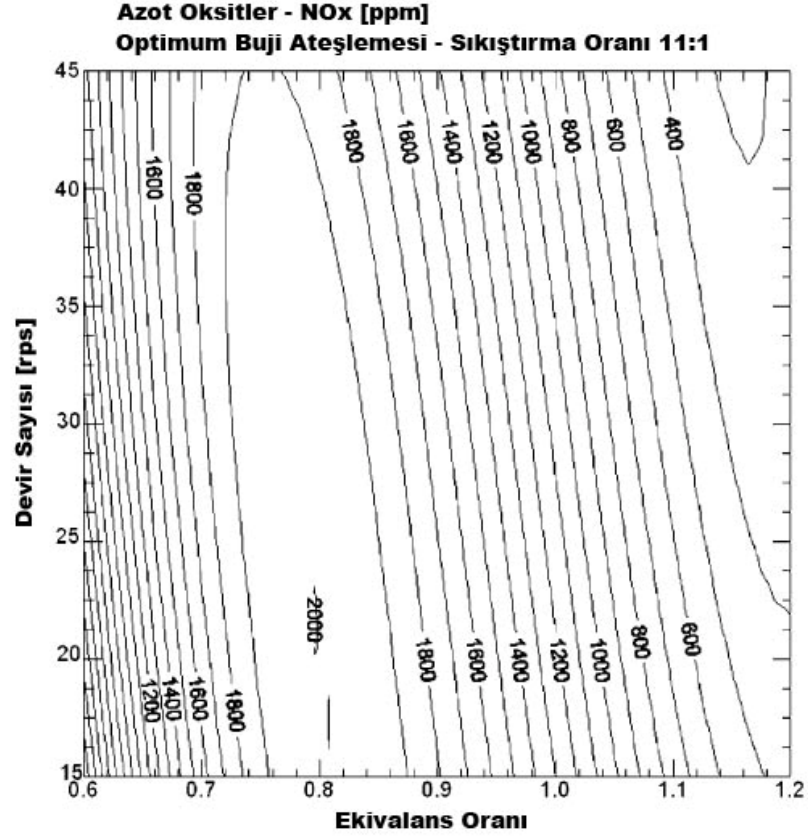
Yakıt olarak Hidrojen kullanan Ricardo E6/US marka, tek silindirli 4 zamanlı deney motoru üzerinde, sıkıştırma oranı, ekivalans oranı ve motor hızının motor performansı ve emisyon karakteristikleri üzerine etkileri incelenmiştir ⁽²⁷⁾.

Kullanılan deney motorunun silindir çapı 76.2 mm, piston kolu uzunluğu 241.3 mm ve stroğu ise 110 mm'dir. Hidrojen hava ile emme manifoldu öncesinde karışmaktadır. Motor gücü bir elektrik dinamometresi yardımı ile belirlenmiştir. Yapılmış olan deneyler sonucunda aşağıdaki şekilde sonuçlar alınmıştır.



Şekil 3.7. Sıkıştırma ve ekivalans oranlarının NO_x emisyonuna etkisi.

Şekil 3.6’de sıkıştırma ve ekivalans oranlarının NO_x emisyonuna etkisi en iyi döndürme momentinin elde edildiği optimumu ateşleme değeri için 25 rps deki değerleri göstermektedir. NO_x emisyonu, sıkıştırma oranının artışına bağlı olarak, 0.8 değerinden büyük bütün ekivalans oranı değerleri için (yanma sıcaklıklarının yüksek olmasına rağmen) oksijen miktarı azaldığı için artmaktadır. Şekilden NO_x emisyonlarının maksimum değerine ekivalans oranının 0.8 değeri için ulaştığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3.8. Sıkıştırma oranı ve motor hızının NO_x emisyonuna etkisi.

Şekil 3.7’de sıkıştırma oranı ve motor hızının NO_x emisyonuna etkisi en iyi ateşleme en iyi döndürme momenti değeri ve kullanılabilir en yüksek sıkıştırma oranı değeri elde edilebilmesi için optimum ateşleme değerindeki değişimi görülmektedir. NO_x emisyonu motor hızının artışına bağlı olarak artmaktadır.

4. SONUÇLAR

Günümüzde mevcut enerji kaynaklarının hızla tükenmekte olması motorlarda kullanılacak alternatif yakıtlar üzerindeki araştırmaları hızlandırmaktadır. Yapılan tez çalışması çerçevesinde alternatif yakıtların benzinli araçlarda kullanımı ve yakıtlardan kaynaklanan kirletici gazların etkileri üzerinde durulmuştur. Ülkemizde halen mevcut olan doğalgaz ve LPG kullanımı enerji açığına çözüm getirmek ve kirletici egzoz gazları emisyonunu azaltmak açısından avantaj sağlayacaktır.

Egzoz emisyonları incelendiğinde LPG gaz yakıt olarak silindire girdiğinden dolayı yanma, tam yanmaya yakın olmakta ve daha az kirletici egzoz emisyonu ortaya çıkmaktadır. Karbonmonoksit ve hidrokarbon emisyonları daha az oluşmaktadır. Kurşunsuz benzin ile çalışmada CO ve HC emisyonlarının değerleri hava fazlalık katsayısının değişimine bağlı olarak değişmektedir. LPG ile çalışmada ise HC emisyonlarında orta yüklerde bir dalgalanma olmaktadır. CO ve HC emisyonları incelendiğinde LPG'nin daha az kirletici emisyon yaydığı görülmektedir. Fakat LPG'nin alt ısı değerinin yüksek olmasından dolayı silindir içindeki sıcaklık artmaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak NOx emisyonları artmaktadır. Bundan dolayı kurşunsuz benzin ve LPG arasında belirgin bir fark yoktur.

CNG ise LPG'ye göre daha çevreci bir yakıttır. Yani yanma neticesinde ortaya çıkan zararlı gazların yüzdesi diğer yakıtlara oranla daha azdır. Bu özelliği nedeniyle bütün dünyada kullanımı teşvik edilmektedir. Oktan sayısının yüksek olmasından dolayı motor yanma verimi daha yüksektir. Sanayileşme sonrası önemi anlaşılan "Çevre", artık hesaplamalarda ilk akla gelen unsur olmuştur. Doğal gazın

da diğerk yakıtlara oranla çok düşük emisyon değerlerine sahip olması taşıtlarda kullanımını destekleyen en önemli etkenlerden bir tanesidir. Lokal seviyelerde emisyonlarda (Hidrokarbon, CO ve NOx) kükürt ve partiküllerde çok düşük değerler elde edilebilir. Ayrıca sera etkisi gazlarında da % 20 oranında bir azalmaya sebep olmaktadır. Bunlara ek olarak doğalgaz temiz yanan bir yakıt olduğundan araç bakımlarını azaltır. Doğalgazlı araçlarda, yakıt alırken veya kullanırken buharlaşma emisyonu oldukça düşük veya sıfırdır denilebilir. Bu durum toplam hidrokarbon emisyonunun % 50'sinin değerlendirilmesi demektir. Tutuşma sıcaklığı 350°C olan benzine göre, tutuşma sıcaklığı 650°C olan doğalgaz yüksek tutuşma sıcaklığı nedeniyle güvenlik açısından da avantaj sağlamaktadır. Ayrıca hava ile % 5 – 15 arası hacimsel bir karışım oluşturmadan doğal gazın yanması mümkün değildir.

Hidrojen ise emisyon açısından en temiz yakıttır. Yanma ürünleri olarak su, yüksek sıcaklıkta yanmadan dolayı NOx ve yanma olayına karışan motor yağının etkisi ile çok az miktarda hidrokarbon emisyonu vardır. Bu nedenle en temiz yakıt olarak kullanılabilir. Fakat, günümüz teknolojileri ile üretilmesi ve depolanması zor olduğuna için ekonomik değildir. Emisyon indirgemesi gerçekleştirilirken aracın kullanıcısının da ekonomik bir yakıt olarak görmesi gerekmektedir. Bu nedenle hidrojen daha çok, deney yakıtı olarak kullanılmaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde yakıt pillerinin daha yaygın kullanımının sağlanması durumunda, temel enerji tüketiminin indirgenmesi ayrıca küresel, bölgesel ve lokal kirleticilerin indirgenmesi açısından yararlı olacaktır. Ulaşım ve güç istasyonlarında sadece yakıt pili kullanımı yönünde yapılacak köklü değişiklikler daha verimli bir çalışma ve diğerk teknolojiler için yapılmış olan tahminlerin ötesinde bir kazanç

sağlayacaktır ve gelecekte daha farklı alternatif yakıt kaynaklarının kullanıma yol açacaktır.

KAYNAKLAR

1. Motorlu Kara Taşıtlarından Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Önlenmesi Paneli, Ankara Valiliği Çevre Koruma Vakfı Yayınları, No : 5, Ankara,1995.
2. J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Inc. , Newyork, 1988.
3. Use of Unleaded Gasoline in Cars Designed for Leaded Gasoline, Chevron USA Inc., 1996.
4. M. P. Hekkert, F. H. J. F. Hendriks, A. P.C. Faaij, M. L. Neelis, Energy Policy, **33**, 579 (2005).
5. S. Salman, İ. Batmaz, Politeknik Dergisi, **1**, 64 (1998).
6. W.K. Cheng, D. Hamrin, J. B. Heywood, SAE, 932708 (1993).
7. D. A. Hamrin, Modeling of Engine-Out HC Emissions for Prototype Production. Master thesis, Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, 1994.
8. M. İ. Karamangil, Benzin Motorlarında HC Emisyonlarının Matematik Modellenmesi. Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2000.
9. J. Schramm, S. C. Sorenson, SAE, 902169 (1990).
10. Hoekstra R.L., Blarigan P.V., Mulligan N, SAE Paper, 961103 (1996).

11. Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği, 2.11.1986 Tarih ve 19269 Sayılı resmi Gazete.
12. O. A. Kutlar, M. Ergeneman, H. Arslan, M. Mutlu, Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler, Birsen Yayınevi, 1998.
13. Z. D. Ristovski, L. Morawska, J. Hitchins, S.Thomas, C. Greenaway and D. Gilbert, Journal of Aerosol Science, **31**, 403, (2000).
14. S.J. Greenwood, J. E. Coxon, T. Biddulph, J. Bennett, SAE Paper, 9610805, (1996).
15. N. Aktaş, Benzinli Motorlarda LPG Kullanımının Güç ve Emisyon Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2000.
16. O. Anket, LPG ve Benzinin Taşıt Performansına Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması, Seminer, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1998.
17. J. W. Vander, R. Rele, Development of Light and Heavy Duty Engine Technology for CNG and LPG, The European Conference on New Fuels and Clean Air, Antwerp/Netherlands, 1991.
18. Z. D. Ristovski, L. Morawska, G. A. Ayoko, G. Johnson, D. Gilbert and C. Greenaway, Journal of Aerosol Science, **31**, 624, (2000).
19. Z. Ristovski , L. Morawska , G. A. Ayoko , G. Johnson , D. Gilbert and C. Greenaway, Science of The Total Environment, **323**, 179, (2004).
20. J. Johnson, K. Baumgard, SAE Paper, 960131, (1996).

21. L. M. Das, R. Gulati, P. K. Gupta, *International Journal of Hydrogen Energy*, **25**, 783, (2000).
22. R. E. Baker, I. Macpherson, *Automotive Engineering*, **91**, 27, (1982).
23. D. Hart, G. Hörmandinger, ETSU, F/02/00111/REP/1, (1997).
24. D. Hart, A. Bauen, *Journal of Power Sources*, **86**, 482, (2000).
25. S. Murillo, J.L. Miguez, J. Porteiro, L.M. Lopez Gonzalez, E. Granada, J.C. Moran, *Applied Thermal Engineering*, **25**, 1882, (2005).
26. S. Çetinkaya, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, **81**, 14 (2004).
27. A. R. Maher, S. Al-Baghdadi, *Renewable Energy*, **29**, 2245 (2004).