

**TAŞIT EMİSYONLARININ LABORATUVAR VE
GERÇEK SÜRÜŞ TESTLERİ KAPSAMINDA
KARŞILAŞTIRILMASI**

Fevzi Buğra AKSOP



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TAŞIT EMİSYONLARININ LABORATUVAR VE GERÇEK SÜRÜŞ
TESTLERİ KAPSAMINDA KARŞILAŞTIRILMASI**

Fevzi Buğra AKSOP
0000-0001-7270-0928

Prof. Dr. Ali SÜR MEN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FEN BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TAŞIT EMİSYONLARININ LABORATUVAR VE GERÇEK SÜRÜŞ TESTLERİ KAPSAMINDA KARŞILAŞTIRILMASI

Fevzi Buğra AKSOP

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali SÜR MEN

Karayolu taşıtlarının havaya saldıkları egzoz emisyonları, gün geçtikçe insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkisi artan ve dolayısıyla kontrol edilmesi gereken bir konu haline almıştır. Taşıtların emisyonlarının kontrolü ve emisyon ölçümleri otomotiv sektöründe günümüzde en çok üzerinde durulan konulardandır ve emisyon regülasyonları ile kontrol altında tutulan emisyon testleri otomobil üreticileri için kritik öneme sahiptir. Fakat yıllardır kullanılagelen, standart bir ortamda, sabit çevrimler ile emisyonların ölçüldüğü laboratuvar testleri, kullanıcıların gerçek sürüş şartlarını temsil etmekte gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle son yıllarda, taşıtların gerçek yol şartlarındaki emisyonlarının ölçüldüğü testler, laboratuvar testleri kadar önemli hale gelmiş, yapılan çalışmalar ileriki yıllarda laboratuvar testlerinin yerini alabileceğini göstermiştir. Gerçek sürüş emisyonları (RDE) testlerinin var olan avantajlarının yanı sıra otomotiv üreticileri için farklı zorluklara da sahiptir. RDE testlerinin laboratuvar testlerine göre daha kapsamlı ve uzun olması, testi gerçekleştirirken gerçek yol şartlarında karşılaşılabilecek riskler, zorlu yol ve hava şartlarında test gerçekleştirilememesi durumu ve olası test iptallerinde harcanan emek ve zamanın boşa çıkması, daha kompakt emisyon ölçüm cihazları ile gerçekleştirilmesi ve bu cihazların daha hassas ve kullanımının daha zor olması gibi zorluklar söz konusudur. Tez kapsamında, bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, RDE testlerinin laboratuvar şartlarında temsil edilmesi incelenmiştir. Bu amaçla referans benzinli bir taşıtlar ile gerçek yol şartlarında gerçekleştirilen RDE testleri laboratuvar şartlarında tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bir başka deyişle laboratuvar testleri ile gerçek yol testleri arasında anlamlı bir korelasyonun olup olmadığı araştırılmıştır. Eğer bu mümkün olursa, laboratuvar testleri sonuçlarından hareketle gerçek yol değerlerini sağlıklı bir şekilde tahmin etmek mümkün olacak ve yukarıda bahsedilen gerçek yol testi zorluklarının hepsi bertaraf edilebilecektir. Karşılaştırmalı testlerin sonuçlarında her bir emisyon gazı için emisyon faktörleri hesaplanmıştır. Emisyon faktörleri azot oksitler (NO_x) için 0,92 - 1,75 arasında, karbon monoksitler (CO) için 0,81 - 1,21 arasında, karbon dioksitler (CO₂) içinse 1,04 - 1,15 arasında bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar neticesinde RDE testlerinin hangi şartlarda ve nasıl laboratuvar ortamında temsil edilebileceği yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gerçek sürüş emisyonları, RDE, egzoz, emisyon

2021, ix + 59 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPARISON OF VEHICLE EMISSIONS IN THE SCOPE OF LABORATORY AND REAL DRIVING TESTS

Fevzi Buğra AKSOP

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali SÜRMEŒ

Exhaust emissions released by road vehicles into the air have become an issue that has an increasing negative impact on human health and therefore needs to be controlled. Vehicle emissions control and emission measurements are among the most emphasized topics in the automotive industry today; and emission tests, which are kept under control with emission regulations, are critical for automobile manufacturers. However, laboratory tests that measure emissions with constant cycles in a standard environment, which have been used for years, do not give realistic results in representing the real driving conditions of the automobile users. For this reason, in recent years, tests that measure the emissions of vehicles under real road conditions have become as important as laboratory tests, and studies have shown that they can replace laboratory tests in the future. Apart from the advantages of real driving emissions (RDE) tests, it also poses different challenges for automotive manufacturers. RDE tests are more comprehensive and longer than laboratory tests, the risks that may be encountered in real road conditions while performing the test, the inability to test in difficult road and weather conditions, and the waste of effort and time in possible test cancellations, the use of more compact emission measuring devices and these devices are more sensitive and difficulties such as being more difficult to use. Within the scope of the thesis, the representation of RDE tests in laboratory conditions was examined in order to overcome these difficulties. For this purpose, RDE tests performed under real road conditions with a reference gasoline vehicle were repeated under laboratory conditions and the results were analyzed comparatively. In other words, it has been investigated whether there is a significant correlation between laboratory tests and real road tests. If this is possible, it will be possible to accurately estimate the actual road values from the results of the laboratory tests, and all of the real road test difficulties mentioned above will be avoided. Emission factors are calculated for each emission gases in the results of the comparative tests. Emission factors were found between 0.92 - 1.75 for nitrogen oxides (NO_x), 0.81 - 1.21 for carbon monoxides (CO), and 1.04 - 1.15 for carbon dioxide (CO₂). As a result of the obtained results, it was interpreted under which conditions and how RDE tests can be represented in the laboratory environment.

Key words: Real driving emissions, RDE, exhaust, emission

2021, ix + 59 pages.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca akademik anlamda bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Ali Sürmen'e ve sayın Prof. Dr. İhsan Karamangil'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez sürecimde; testleri gerçekleştirmemdeki yoğun emek ve katkılarından dolayı Tofaş Emisyon Laboratuvarı sorumlusu Hakan Öner başta olmak üzere tüm laboratuvar personeline ve tezime buldukları katkılarından dolayı yöneticilerim Türker GÜdü ve Cengiz Özkan'a teşekkürlerimi sunarım.

Fevzi Buğra AKSOP
07/06/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Taşıtlardaki Emisyon Kaynakları	3
2.1.1. Egzoz emisyonları	3
2.1.2. Buharlaştırma ile Yayılan (BiY) Emisyonlar	4
2.1.3. Aşınma emisyonları	5
2.2. Egzoz Emisyonları ve Zararları	6
2.2.1. Karbon dioksit (CO ₂)	6
2.2.2. Karbon monoksit (CO)	7
2.2.3. Azot oksitler (NO _x)	8
2.2.4. Hidrokarbon (HC)	8
2.2.5. Partiküller (PM/PN)	9
2.2.6. Emisyon standartlarına tabi olmayan diğer kirleticiler	10
2.3. Emisyon Standartları	10
2.3.1. Avrupa standardı emisyon limitleri	11
2.3.2. CO ₂ filo hedefleri	12
2.4. Emisyon Testleri	13
2.5. Egzoz Emisyonu Ölçüm Yöntemleri	14
2.5.1. Seyreltilmiş ölçüm	14
2.5.2. Ham Ölçüm	14
2.6. Tip 1: Egzoz Emisyonu Testi (WLTP)	15
2.6.1. Test ekipmanları	15
2.6.2. Test çevrimi (WLTC)	16
2.6.3. Test prosedürü	18
2.6.4. Test sonucu	18
2.7. Tip 1A: Gerçek Sürüş Emisyonları Testi (RDE)	19
2.7.1. Test ekipmanları	20
2.7.2. Test çevrimi	22
2.7.3. Test prosedürü	22
2.7.4. Test sonucu	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM	24
3.1. Çalışmanın Amacı	24
3.2. Yöntem	24
3.3. Taşıt Seçimi	25
3.4. Test Çevrimleri	26
3.4.1. RDE testi çevrimi	26
3.4.2. RDE laboratuvar temsil çevrimi (LTC)	27
3.5. Emisyon Ölçüm Cihazı	28
3.5.1. Gas PEMS ölçüm sistemi	28
3.5.2. PN PEMS ölçüm sistemi	31

3.6. Başlangıç Şartları.....	32
3.7. Yol Yükleri.....	32
3.8. Ortam Şartları	34
4. BULGULAR	36
4.1. Test Verileri.....	36
4.2. Test Sonuçları	44
4.3. Emisyon Faktörleri.....	45
4.3.1. NOx faktörü	45
4.3.2. CO faktörü	47
4.3.3. CO2 faktörü	49
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	52
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	Error! Bookmark not defined.

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A1, A2	NOx Emisyon Katsayısı [mg/km]
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACEA	Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği
AÇA	Avrupa Çevre Ajansı
AEA	Avrupa Ekonomik Alanı
B1, B2	CO Emisyon Katsayısı [mg/km]
BiY	Buharlaştırma ile Yayılan
C1, C2	CO2 Emisyon Katsayısı [g/km]
CAN	Kontrol Alan Ağı
CF	Uygunluk Faktörü
CoP	Üretim Doğrulama
CVS	Sabit Hacim Örnekleyici
DI	Direkt Enjeksiyon
DOHC	Üstten Eksantrikli Motor
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
EC	Avrupa Komisyonu
EDL	Elektrotsuz Deşarj Lambası
EFM	Egzoz Debi Ölçer
GDI	Benzin direkt enjeksiyon
GPS	Küresel Konumlama Sistemi
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
IDI	Endirekt Enjeksiyon
ISC	Kullanım Uygunluğu
JAMA	Japon Otomobil Üreticileri Birliği
KAMA	Kore Otomobil Üreticileri Birliği
KOAH	Kronik Obstrüktif Akciğer Hastalığı
LTC	RDE Laboratuvar Temsil Çevrimi
MPI	Çok Noktalı Püskürtme
NDIR	Non-Dispersive Infrared Analyzer Analizörü
NDUV	Non-Dispersive Ultraviolet Analizörü
NEDC	Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü
P	NOx ve CO Gazlarının Derişim Katsayısı [ppm]
PEMS	Portatif Emisyon Ölçüm Sistemi
PMR	Güç-Kütle Oranı
RDE	Gerçek Sürüş Emisyonları
SCR	Seçici katalitik indirgeme
TA	Tip Onay
TWC	Üç Yollu Katalitik Konvertör
UV	Ultra Viole
VPR	Uçucu Partikül Sökücü
WLTC	Dünya Genelinde Uyumlaştırılmış Hafif Hizmet Taşıtları Test Döngüsü
WLTP	Dünya Genelinde Uyumlaştırılmış Hafif Hizmet Taşıtları Test Prosedürü
Y	CO2 Gazının Yüzde Katsayısı [%]

Kısaltmalar	Açıklama
#/km	Adet/Kilometre
°C	Derece Santigrat
µm	Mikrometre
BG	Beygir Gücü
cc	Santimetreküp
CH4	Metan
CnHm	Taşıt Yakıtlarının Genel Kimyasal İfadesi
CO	Karbon monoksit
CO2	Karbon dioksit
d/dak	Dakikadaki Motor Devri
dak	Dakika
f0, f1, f2	Yol Yükleri
g H2O/kg kuru hava	1 Kilogram Kuru Havadaki Suyun Gram Olarak Miktarı
g/km	Gram/Kilometre
H2O	Su
HC	Hidrokarbon
HNO3	Nitrik Asit
Kg	Kilogram
km/s	Kilometre/Saat
km	Kilometre
kW	Kilowatt
l/100 km	Litre/100 Kilometre
m	Metre
mg/km	Miligram/Kilometre
mm	Milimetre
ms	Mili Saniye
N2	Azot
NH3	Amonyak
nm	Nanometre
Nm	Newtonmetre
NO	Azot Oksit
NO2	Azot Dioksit
NOx	Azot oksitler
O2 + 3,76 N2	Hava
O2	Oksijen
PbBr2	Kurşun Bromür
PM	Partikül Kütlesi
PM10	10 µm çapında ve altındaki partiküller
PM2,5	2,5 µm çapında ve altındaki partiküller
PN	Partikül Sayısı
ppm	Milyonda Bir Birim
S	Kükürt
s	Saniye
SO2	Kükürt Dioksit
Vmax	Maksimum Hız

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Aktif karbon kutusu sistemi.....	5
Şekil 2.2. a) Benzinli ve b) dizel taşıtların ortalama egzoz emisyon dağılımları.....	6
Şekil 2.3. Sera etkisi.....	7
Şekil 2.4. Egzoz emisyonlarının HFK'na göre değişimi	9
Şekil 2.5. Seyreltilmiş ölçüm yöntemi	14
Şekil 2.6. Tip 1: egzoz emisyonu testi ekipmanları.....	16
Şekil 2.7. Class 3b taşıtları WLTC çevrimi	18
Şekil 2.8. Farklı çevrimlerin yük-devir haritası.....	20
Şekil 2.9. RDE testi ekipmanları	21
Şekil 3.1. RDE test rotası faz gösterimi	27
Şekil 3.2. Gas PEMS ölçüm sistemi	29
Şekil 3.3. NDUV analizörü	30
Şekil 3.4. NDIR analizörü	30
Şekil 3.5. PN PEMS ölçüm sistemi	31
Şekil 3.6. PN PEMS partikül sayım hücresi.....	32
Şekil 3.7. Taşıta etkiyen direnç kuvvetleri.....	33
Şekil 3.8. Coastdown testi ve yol yüklerinin belirlenmesi.....	33
Şekil 4.1. RDE ve LTÇ testlerinin hız – zaman profilleri.....	37
Şekil 4.2. RDE testleri ortam sıcaklıkları.....	40
Şekil 4.3. RDE testleri bağıl nem	41
Şekil 4.4. RDE testleri rakım.....	42
Şekil 4.5. RDE testleri ortam basıncı.....	43
Şekil 4.6. RDE ve LTÇ testleri NOx faktörleri	46
Şekil 4.7. NOx faktör analizi.....	47
Şekil 4.8. RDE ve LTÇ testleri CO faktörleri	48
Şekil 4.9. CO faktör analizi.....	49
Şekil 4.10. RDE ve LTÇ testleri CO2 faktörleri	50
Şekil 4.11. CO2 faktör analizi	51
Şekil 5.1. Emisyon faktörleri.....	52
Şekil 5.2. RDE ve LTÇ testlerinin ortalama motor yükü değerlerinin ortalamalarının grafik gösterimi.....	54
Şekil 5.3. RDE ve LTÇ testlerinin ortalama motor sıcaklıkları	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Binek taşıtlar için Avrupa emisyon seviyeleri ve başlangıç tarihleri.....	11
Çizelge 2.2. Euro 6 alt emisyon seviyeleri.....	12
Çizelge 2.3. WLTC fazları	17
Çizelge 2.4. Class 3b sınıfı taşıtların WLTC test şartları.....	17
Çizelge 2.5. M1 & N1 Class 1, N1 Class 2 ve N1 Class 3 için Euro 6D emisyon limitleri	19
Çizelge 2.6. RDE emisyon limitleri.....	23
Çizelge 3.1. Referans taşıtın özellikleri	25
Çizelge 3.2. RDE testi limitleri	26
Çizelge 4.1. RDE ve LTÇ test süreleri	38
Çizelge 4.2. RDE ve LTÇ test mesafeleri	38
Çizelge 4.3. RDE ve LTÇ test mesafeleri	39
Çizelge 4.4. RDE ve LTÇ testleri emisyon sonuçları.....	44
Çizelge 4.5. NOx, CO ve CO2 faktörleri	45
Çizelge 5.1. RDE ve LTÇ testlerinin ortalama motor yükü değerleri	53

1. GİRİŞ

İnsanların bir arada yaşamaya başlayıp toplumları oluşturması ile birlikte çeşitli ihtiyaçlar ortaya çıkmıştır. Artan nüfus yoğunluğu ile birlikte bu ihtiyaçlar; tarım, sanayi, ulaşım gibi sektörlerin büyüüp gelişmesine neden olmuştur. Fakat bu gelişim doğal kaynakların tükenmesi, çevre kirliliği gibi çeşitli olumsuzlukları da beraberinde getirmiştir. Bütün bu sürecin bir sonucu olarak insan sağlığı, günümüzde insanlığın en önemli ve en çok üzerinde durduğu sorunlardan biri olarak karşımıza çıkar (Ortiz, 2020). Doğal afetler, salgın hastalıklar gibi doğal etkenler dışında insan sağlığını en çok etkileyen konulardan birisi hava kirliliğidir. Hava kirliliği insanın yaşam kalitesini etkilediği gibi, birçok hastalık ve ölümün temel nedenidir (World Health Organization, 2018).

Dünya'daki pek çok ülke ve kuruluş hava kirliliği ile mücadele anlamında farklı önlemler almaktadır. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) gibi kuruluşlar çeşitli hava kirliliği önlem çalışmaları yürütürken; ülkeler de Paris Anlaşması, Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi politikalar ile onları desteklemektedir (European Commission, 2019). Hava kirliliği ile mücadelede temel yaklaşım, hava kirliliğine neden olan ve genel olarak emisyon olarak adlandırılan zehirli gazların havaya karışmasını önlemektir. Bu konuda tarım, sanayi, ulaşım gibi birçok sektör çeşitli kurallar ile denetlenmekte ve yaptırımlar ile kontrol altında tutulmaktadır.

Ulaşım, başta karayolu taşımacılığı olmak üzere topluma ve insan hayatına sayısız fayda sağlar. Bu faydalara ve son yıllarda elde edilen teknolojik gelişmelere rağmen karayolu taşımacılığı, sera gazı ve kirlenici emisyonların en büyük kaynaklarından biridir. Taşıtlardan yayılan emisyonlar insan sağlığına ve çevreye ciddi zararlar vermektedir (OECD, 2020). Bu nedenle taşıt emisyonları, sektörün hedeflerini belirlemede başı çeken bir konu olup, taşıt kullanıcıları ve üreticileri için gün geçtikçe önemi artmaktadır.

Taşıt emisyonlarının bu derece önemli olması, onların kontrolü ve ölçümü konusunu da önemli kılar. Üreticiler için taşıt geliştirme sürecindeki en önemli konulardan bir tanesi güncel emisyon limitlerine uygun taşıt geliştirmektir. Otomotiv sektöründeki araştırma ve geliştirme süreçlerinin önemli bir kısmı emisyon kurallarına uygun taşıtlar üretmek

için harcanır. Hal böyle iken geliştirilip üretilen ve kullanıcıya sunulan taşıtın emisyon ölçümleri de önemli bir hal almıştır. Geleneksel emisyon ölçüm yöntemleri, son yıllarda yerini daha yenilikçi ölçüm metotlarına ve testlere bırakmaya başlamıştır. Standart laboratuvar ortamında, büyük ve kompleks cihazlar ile yapılan emisyon ölçümleri, gelişen teknoloji ile hareket halindeki bir taşıtta, gerçek yol şartlarında yapılabilir hale gelmiştir. Bu kapsamda, taşıtın gerçek kullanımda yaydığı emisyonları daha gerçekçi bir şekilde ölçen ve bu nedenle son yıllarda önemi artan Gerçek Sürüş Emisyonları (RDE) testi, geliştirmesi tamamlanmış bir taşıtın tip onay aşamasında yapılması zorunlu olan ve uygunluk kriterleri üreticiler için gün geçtikçe daha zorlayıcı hale gelen bir test olarak sektörde yer edinmiştir.

RDE testi taşıta yerleştirilen kompakt bir portatif ölçüm cihazı ile standartlar tarafından belirlenen sınırlar içerisinde gerçekleştirilen ve geleneksel laboratuvar testlerine göre daha kapsamlı bir testtir. Cihazın taşıta adaptasyonu, ölçüm hassasiyeti yüksek kompakt bir cihaz olduğu için test öncesi ve sonrası ölçüm doğrulamalarının yapılması gerekliliği, test esnasında gerçek yol şartlarında taşıta ve cihazın başına gelmesi muhtemel riskler, yağmur, kar gibi ekstrem hava şartlarında testi gerçekleştirmenin zorluğu gibi nedenlerden ötürü RDE testlerinin standart laboratuvar testlerine göre çok daha uzun sürelerde gerçekleştirilmesi, testlerin kolaylıkla geçersiz sayılabilmesi ve tekrarının uzun süren hazırlık süreçleri gerektirmesi gibi farklı zorluklar söz konusudur. Ayrıca taşıtın geliştirme aşamasında gerçekleştirilmesi gereken tekrarlı emisyon doğrulamalarını RDE testi ile gerçekleştirmek üreticiler için zor bir süreçtir. Bu gibi nedenlerden ötürü, RDE testlerinin standart laboratuvar ortamında temsil edilme ihtiyacı doğmuştur.

Tez kapsamında; RDE testleri laboratuvar ortamında, mümkün olduğu kadar benzer şartlarda temsil edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve her bir emisyon gazı için elde edilen faktörler ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

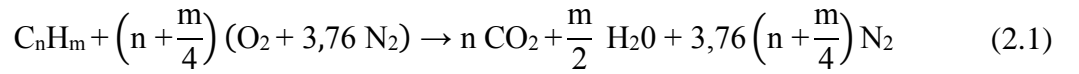
2.1. Taşıtlardaki Emisyon Kaynakları

European Environment Agency'ye (2016) göre, motorlu taşıtlar tarafından yayılan emisyonların kaynakları 3 ana grupta toplanabilir:

- Egzoz emisyonları: Yakıtın yanması sonucu oluşan ve egzoz vasıtasıyla dışarı atılan emisyonlardır. Taşıt kaynaklı emisyonların çoğunu oluştururlar.
- Buharlaştırma ile yayılan (BiY) emisyonlar: Taşıtın yakıt sisteminden buharlaşan emisyonlardır. Taşıt, çalışmadığı halde dahi salınmaya devam eder.
- Aşınma emisyonları: Lastik ve fren gibi taşıt parçalarının mekanik aşınması ve korozyonundan kaynaklanan emisyonlardır.

2.1.1. Egzoz emisyonları

İçten yanmalı motorlar; hidrokarbon kökenli yakıtların (C_nH_m), hava ($O_2 + 3,76 N_2$) ile karışıp yüksek basınç ve sıcaklık altında yanması ve bu yanma sonucu ortaya çıkan enerjinin hareket enerjisine çevrilmesi prensibi ile çalışır (Heywood, 1988). Pistondaki yakıt-hava karışımı, motorun tipine bağlı olarak dışarıdan ateşleme veya kendinden tutuşma ile ateşlenir ve yanma meydana gelir. İdeal koşullar altında bu tepkimeden, aşağıdaki teorik tam yanma reaksiyonundan da görülebileceği gibi su (H_2O), azot (N_2) ve karbon dioksit (CO_2) gibi üç adet yanma ürünü ortaya çıkar (Soruşbay):



Ancak ideal şartların sağlanamaması ve yanmanın tam olmaması sonucunda, yanma işlemi sonrası yan ürün olarak kirletici maddeler de ortaya çıkar. En yaygın ve yüksek konsantrasyonlu olanları;

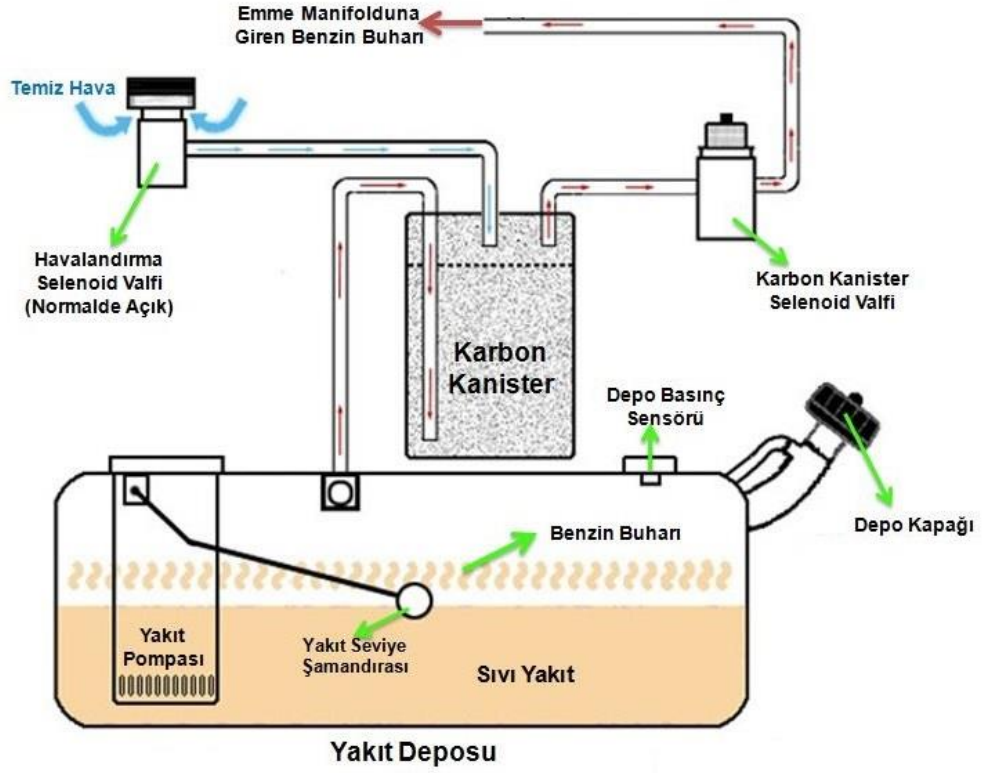
- Karbon monoksit (CO)
- Azot oksitler (NO_x)
- Partiküller (PM/PN)
- Hidrokarbon (HC)

- Emisyon standartlarına tabi olmayan diğerkirleticilerdir.

Yanma ürünlerinden su ve azot, atmosferin doğal bileşiminde bulunan bileşenler olduklarından kirletici gaz olarak nitelendirilmezler. Bunlar dışında kalan egzoz emisyon gazları direkt ya da dolaylı olarak insan sağlığına ve çevreye zarar verdiğinden kirletici gazlar olarak adlandırılırlar.

2.1.2. Buharlaşıma ile Yayılan (BiY) Emisyonlar

Taşıtkaynaklı emisyonların çoğuegzoz emisyonları olsa da göz ardı edilmemesi gereken bir diğertür BiY emisyonlardır. Taşıtkaynaklı HC emisyonlarının %10 ila %25'i, yakıt deposu ve yakıt hatlarındaki benzinin buharlaşması sonucu doğaya salınmasıyla gerçekleşir. BiY emisyonlar, egzoz emisyonlarının aksine motor çalışmıyorken, taşıtpark halinde de salınabilir (Mellios, Smit ve Ntziachristos, 2013). BiY emisyonların önüne geçmek için; yakıt sistemi içerisinde buharlaşan yakıtın-HC'ların kömür tarafından tutulduğu aktif karbon kutusu sistemi kullanılır. Aktif karbon kutusu yakıt deposu ile emme manifoldu arasına yerleştirilen ve için buhar fazındaki hidrokarbonları emmeye eğilimli aktif karbonla dolu bir kutudur. Kontrol edilebilen bir valf ile motor çalışmazken depoya açık, çalışırken ise emme manifolduna açıktır. Dolayısıyla motor çalışırken emme manifoldunda oluşan vakum aktif karbonun absorbe ettiği hidrokarbonun yanmaya katılmak üzere salınmasını sağlar. Böylece bu sistemde depolanan yakıtlar doğaya salınmadan geri kazanılmış olur (Frosina vd., 2018). BiY emisyonlar da egzoz emisyonları gibi standartlar kapsamında test edilen ve kontrol altında tutulan emisyonlardır.



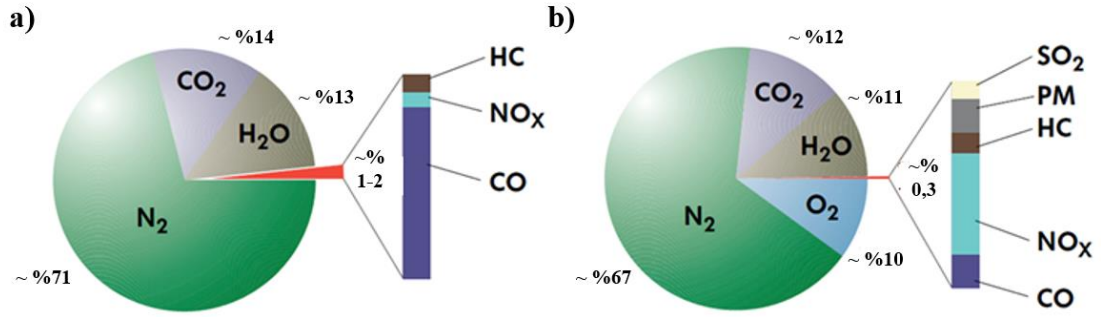
Şekil 2.1. Aktif karbon kutusu sistemi

2.1.3. Aşınma emisyonları

Aşınma emisyonları önemli bir partikül emisyonu kaynağıdır. Taşıttaki birçok mekanik parça, kullanıma bağlı olarak zaman içinde korozyona ve aşınmaya maruz kalır ve bunlar sonucunda taşıttan çeşitli partiküller salınabilir (Penkała, M., Ogradnik, P., Rogula-Kozłowska, 2018). Bunlar içinde fren ve lastik aşınmaları, sürekli olduklarından dolayı, önde gelirler. Aşınma emisyonları mevcut standartlarda sınırlandırılan ve kontrol altında tutulan emisyonlardan değildir. Yapılan araştırmalar partikül kaynağı olarak aşınma emisyonlarının, egzoz emisyonlarının yıllar içindeki kontrol altına alınmasıyla birlikte, egzoz emisyonları ile neredeyse aynı seviyelere geldiğini göstermiştir (Anonim, 2020). Önümüzdeki yıllarda aşınma emisyonlarının da standartlar kapsamında kontrol altına alınması beklenmektedir.

2.2. Egzoz Emisyonları ve Zararları

Egzoz emisyonları, taşıtta kullanılan yakıt türüne göre farklılık gösterir (Şekil 2.1). Benzinli taşıtlarda CO ve HC emisyonları yüksekken, dizel taşıtlarda NO_x ve partikül emisyonları yüksektir. Bütün bu egzoz emisyonlarının insan sağlığına ve doğaya çeşitli zararları söz konusudur.

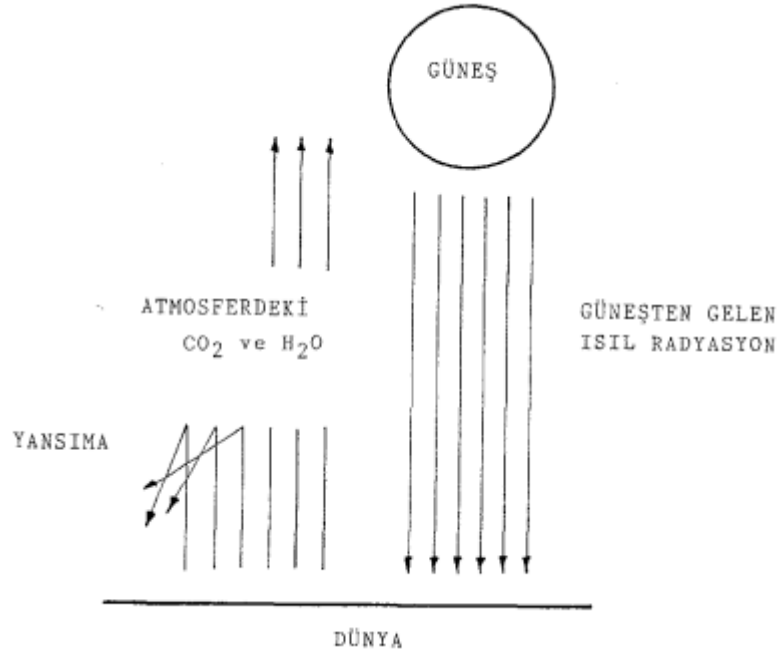


Şekil 2.2. a) Benzinli ve b) dizel taşıtların ortalama egzoz emisyon dağılımları (Volkswagen: Self-Study Programme 230 - Motor Vehicle Exhaust Emissions, 2000)

2.2.1. Karbon dioksit (CO₂)

CO₂'ler yakıttaki karbonun yanma sırasında oksijen (O₂) ile tepkimeye girmesi sonucu oluşur. Diğer kirleticilerin aksine, yanma mekanizması gereği, ideal koşullarda ortaya çıkar. Dizel motorlar benzinli motorlara göre daha yüksek verimde çalıştılarından daha düşük CO₂ emisyonuna sahiptirler (Dornoff ve Rodríguez, 2019).

CO₂ gazı salınımı doğrudan insan sağlığına zarar vermese de sera etkisine neden olan gazların başında gelir. Salınan CO₂'lerin yaklaşık %50'si atmosferde birikerek CO₂ konsantrasyonunun artmasına neden olmaktadır. Bu artış; Güneş'ten gelen radyasyonun atmosferde birikerek atmosferin sıcaklığının artmasına neden olmaktadır (Şekil 2.2) (Soruşbay).



Şekil 2.3. Sera etkisi

2.2.2. Karbon monoksit (CO)

Yanma ürünlerinin arasında CO bulunmasının ana nedeni O₂ yetersizliğidir. Yakıt hava karışımındaki O₂ genel anlamda yetersiz olabileceği gibi, karışımın homojen olmaması durumunda da lokal yetersizlikler söz konusu olabilir. CO oluşumu, hava fazlalık katsayısının (HFK) kuvvetli bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Karışım zenginleştikçe, yani karışımındaki hava/O₂ oranı azaldıkça, CO emisyonları artar. Benzinli motorlar, dizel motorlara göre daha zengin karışımlarda çalıştığından, CO emisyonları daha fazladır (Pulkrabek, 2004). Bununla birlikte homojen karışım da olsa oksijen bol da olsa (HFK>1 bile olsa), CO'nin ortaya çıkmadığı hiçbir gerçek reaksiyon yoktur.

CO kokusuz ve renksiz bir gazdır. Hemoglobine bağlanma yeteneği O₂'in 200 katı olduğundan, CO soluyan bir kişinin vücut hücreleri zamanla O₂ alamayacağından zehirlenme ve boğulmaya neden olur.

2.2.3. Azot oksitler (NOx)

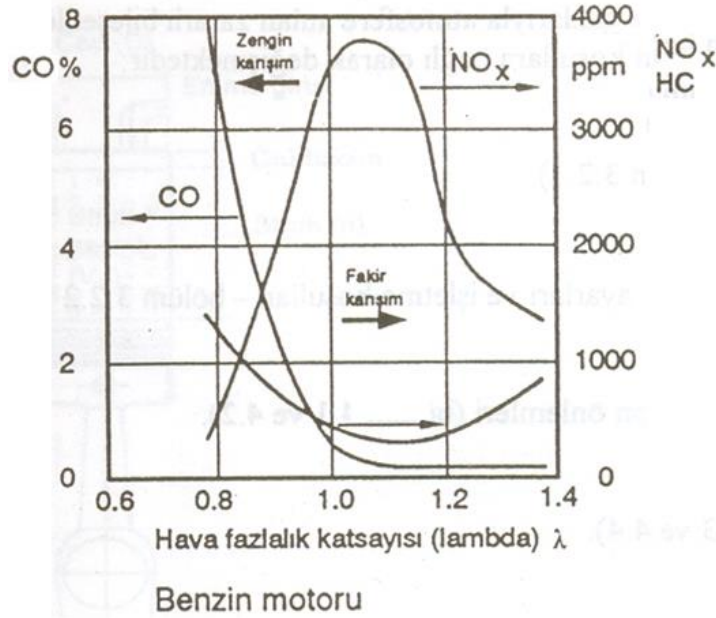
Heywood'a (1988) göre; yanma sonucu ulaşılan yüksek sıcaklıklarda, havanın içerisindeki N₂'un O₂ ile birleşmesi sonucu NOx'ler meydana gelir. NOx'ler içerisinde ana eleman olarak genellikle azot oksit (NO) bulunmaktadır. Egzoz gazlarının atmosfere salınması sonucu NOx'ler bir kısmı O₂ ile temas ederek azot dioksit (NO₂) ve diğer NOx gazlarına donüşmektedir. NOx'ler oluşumunu etkileyen bir diğer parametre ise HFK'dır. Karışım zenginleştikçe, NOx seviyesi düşmektedir. Maksimum değere ise %10 fakir karışimlarda ulaşılmaktadır. Hava miktarı daha da arttırıldığı zaman yanma sıcaklığı düşeceğinden NOx miktarı da azalacaktır. Benzinli motorlarla kıyaslandığında dizel motorların çok daha yüksek oranda NOx emisyonları oluşturması, dizel motorların yüksek sıkıştırma oranları ile çalışmalarından kaynaklanmaktadır. Yüksek sıkıştırma oranları silindir içi sıcaklığı arttırmakta, bu da NOx emisyonlarında artışa sebebiyet vermektedir.

NO renksiz ve kokusuz iken, NO₂ kırmızı-kahverengi, kotu kokulu ve tahriş edici bir gazdır. CO gibi kandaki hemoglobinin ile birleşmelerinin yanı sıra en önemli etkisi ciğerde nemle birleşerek nitrik asit (HNO₃) oluşturmalarındır. Anlık etkisi az olsa da zamanla birikmesiyle solunum hastalıklarına yol açarlar.

2.2.4. Hidrokarbon (HC)

Egzoz gazlarındaki HC emisyonlarının nedeni, sıcaklık ve O₂'in yetersiz olması gibi etkenler sonucunda yanmanın tamamlanamamasıdır. Yanma odası cidarlarındaki ısı kayıpları nedeniyle buralardaki yakıtın tutuşmaması sonucu ortaya çıkarlar. Dizel motorlarda yakıt, yanma odasında benzin motorlara göre daha kısa bir süre bulunmaktadır. Bu da HC emisyonu oluşum mekanizmalarının gerçekleşmesi için daha az zaman olduğu anlamına gelmektedir. Dizel motorlarında HC emisyonlarının düşük olması bu şekilde açıklanabilir. HFK'nın 1,1 değeri civarında HC emisyonları minimumdur. Fakir karışimlarda yanma odası sıcaklığı düşeceğinden tam yanma olmaz ve HC emisyonları artar. Zengin karışimlarda ise yeterli O₂ olmadığından yakıtın tümü yanamaz ve HC emisyonları artar (Stone ve Jeffrey, 2004).

Kötü kokuya sahip olan HC'lar güneş ışığı altında NO_x'ler ile birleşerek "fotokimyasal sis" olarak adlandırılan bir sis tabakası oluştururlar. Göz yanması/sulanması ve solunum sisteminin etkilenmesine neden olurlar. Ayrıca kanser yapıcı etkiye sahiptirler.



Şekil 2.4. Egzoz emisyonlarının HFK'na göre değişimi

2.2.5. Partiküller (PM/PN)

Yanmanın tamamlanması için zaman ve O₂ bulunmadığı durumlarda oluşan katı karbon taneciklerine partikül denir. Partiküller, partikül sayısı (PN) ve partikül kütlesi (PM) olarak iki ayrı şekilde incelenir. Direkt enjeksiyonlu (DI) motorlarda hava ve yakıt, indirekt enjeksiyonlu (IDI) motorlara göre karışmak için daha az zamana sahip olduğundan bu motorlarda partikül emisyonları daha fazladır. Aşırı zengin karışımla çalışma koşulları dışında indirekt enjeksiyonlu motorlarda partikül oluşumları yok denecek kadar azdır (Pulkrabek, 2004).

Partiküller; başta akciğer kanseri olmak üzere birinci derecede kanserojen etkiye sahiptir. PM₁₀ (10 µm çapında ve altındaki partiküller) akciğerlere kadar taşınıp solunum yolları hastalıklarına (astım, KOAH) neden olurken, PM_{2,5} (2,5 µm çapında ve altındaki partiküller) kan yoluyla bütün vücutta taşınabilir ve kalp hastalıklarına neden olabilirler. Tüm alt solunum yolu enfeksiyonları ölümlerinin %27,5'inden ve tüm KOAH

ölümlerinin %26,8'inden dış ortam havasındaki partikül maddeler sorumludur (Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri – Kara Rapor, 2020).

2.2.6. Emisyon standartlarına tabi olmayan diğer kirlleticiler

- Kükürt dioksit (SO₂): Yakıt içerisinde bulunan kükürt (S) miktarına bağlı olarak, özellikle dizel motorlarda, yanma sonucu kükürtün hava ile birleşmesi ile SO₂ oluşmaktadır. Egzoz emisyonu anlamında sınırlandırılmasa da yakıt içeriğinde farklı limitleri vardır.
- Amonyak (NH₃): Seçici katalitik indirgeme (SCR) sisteminin kullanıldığı taşıtlarda indirgeyici olarak kullanılmaktadır. NO_x'leri azaltma amacıyla egzoz gazlarının üzerine püskürtülür. Güncel emisyon standartlarında sınırlandırılmasa da Euro 7 emisyon seviyesi ile sınırlandırılması beklenmektedir.
- Kurşun ve kurşunlu bileşenler: Benzinin oktan sayısını (benzinin kendi kendine tutuşmasına olan direnci) arttırmak için kullanılan kurşun, egzoz gazları içinde kurşun bromür (PbBr₂) gibi zararlı bileşenlerin oluşmasına neden olmaktadır (Soruşbay).

2.3. Emisyon Standartları

Taşıtlı kaynaklı emisyonların insan sağlığına ve çevreye verdiği ciddi zararlardan dolayı bu emisyonları kontrol etme ihtiyacı doğmuştur. Bu kontroller standartlar ile üreticiler için zorunlu hale getirilmiştir. Taşıtlı kaynaklı emisyonlar, farklı ülkeler tarafından iki ana standart ile kontrol altına alınmaktadır:

- Amerika ve bazı Orta-Güney Amerika ülkelerinin kullandığı ABD standardı
- Avrupa Birliği'ne (AB) üye ve Türkiye, Rusya gibi bazı diğer ülkelerin takip ettiği Avrupa standardı

Çin, Hindistan, Brezilya ve Japonya gibi bazı ülkeler ise bu mevzuattan devşirdikleri kendi mevzuatlarını uygulamaktadır. Ülkelerin bu standartlara uymaları konusunda bir engelleri bulunmamaktadır. Türkiye, 1 Ekim 2019 tarihinden itibaren binek ve hafif ticari taşıtlarda Avrupa emisyon standardına tam uyum sağlamaktadır.

2.3.1. Avrupa standardı emisyon limitleri

Avrupa emisyon standartları, AB ve Avrupa Ekonomik Alanı (AEA) üyesi ülkelerde satılan taşıtların emisyon konusundaki kurallarını, “Euro” standartları adı altında tanımlamaktadır. Emisyon limitleri, hafif yolcu taşıtları için Euro 1 emisyon seviyesi ile birlikte 1992 yılında hayata geçirilmiştir (Hooftman, Messagie, Van Mierlo ve Coosemans, 2018). İlerleyen yıllarda gelişen teknolojiye ve artan hava kirliliğine bağlı olarak limitler giderek azalmış ve taşıtlardan daha az emisyon salımları hedeflenmiştir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Binek taşıtlar için Avrupa emisyon seviyeleri ve başlangıç tarihleri

Benzin		Dizel	
Emisyon Seviyesi	Başlangıç Tarihi	Emisyon Seviyesi	Başlangıç Tarihi
Euro 1	07.1992	Euro 1	07.1992
Euro 2	01.1996	Euro 2, IDI	01.1996
		Euro 2, DI	01.1996 ⁽¹⁾
Euro 3	01.2000	Euro 3	01.2000
Euro 4	01.2005	Euro 4	01.2005
Euro 5	09.2009 ⁽⁴⁾	Euro 5A	09.2009 ⁽²⁾
		Euro 5B/B+	09.2011 ⁽³⁾
Euro 6B	09.2014	Euro 6B	09.2014
Euro 6C	09.2018	Euro 6C	09.2018
Euro 6D-Temp	09.2019	Euro 6D-Temp	09.2019
Euro 6D-Final	01.2020	Euro 6D-Final	01.2020

(1): 30.09.1999 tarihinden sonra DI taşıtlar IDI taşıt limitlerine uymalı
(2): Tüm modeller için 01.2011
(3): Tüm modeller için 01.2013

Güncel Euro 6 emisyon seviyesi, farklı alt seviyeler sahiptir. Bu seviyeler aynı emisyon limitlerine sahip olsa da her birinin uyması gereken farklı prosedürleri vardır. Euro 6C ile birlikte Yeni Avrupa Sürüş Döngüsü’nden (NEDC) Dünya Geneline Uyumlaştırılmış Hafif Hizmet Taşıtları Test Döngüsü’ne (WLTC) geçilirken, Euro 6D-Temp ile beraber Gerçek Sürüş Emisyonları (RDE) testi başlamıştır. Euro 6D-Final ile beraber ise NO_x gazının Uygunluk Faktörü (CF) 2,10’den 1,43’e düşmüştür (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Euro 6 alt emisyon seviyeleri (Anonim, 2017)

	Euro 6B	Euro 6C	Euro 6D- Temp	Euro 6D- Final
Emisyon Limiti	A ⁽¹⁾	A ⁽¹⁾	A ⁽¹⁾	A ⁽¹⁾
Tip 1: Egzoz Emisyon Testi Çevrimi	NEDC	WLTC	WLTC	WLTC
Tip 1A: Gerçek Sürüş Emisyonları (RDE) Testi	Yok	Yok	Var	Var
CF NO _x ⁽²⁾	-	-	2,10	1,43
CF PN ⁽³⁾	-	-	1,50	1,50
<i>(1): Bütün emisyon seviyelerinin aynı limitlere tabi olduğunu ifade etmek amacıyla kullanılmıştır.</i>				
<i>(2): RDE testindeki NO_x emisyonu uygunluk faktörü</i>				
<i>(3): RDE testindeki PN emisyonu uygunluk faktörü</i>				

2.3.2. CO2 filo hedefleri

CO2 emisyonları olarak bilinen sera gazı emisyonları diğer kirleticilerden farklı bir sınırlamaya tabidir. CO2 emisyonunun diğer kirleticiler gibi tekil taşıt özelinde uyması gereken limitleri yoktur. Bunun yerine, binek ve hafif ticari taşıtlarda farklı olmak üzere, her üretici kendi taşıt ailesi için toplu bir filo hedefine sahiptir. Üreticilerden, sahip oldukları bütün taşıtların ortalama CO2 emisyonları hedeflerini gerçekleştirmeleri beklenir. CO2 filo hedefleri ilk olarak 1998/98 yılında Avrupa komisyonu (EC) ile Avrupa Otomobil Üreticileri Birliği (ACEA), Japon Otomobil Üreticileri Birliği (JAMA) ve Kore Otomobil Üreticileri Birliği (KAMA) arasındaki anlaşma sonucu hayata geçmiştir.

Yeni üretilen binek taşıtlar için NEDC çevrimindeki CO2 filo hedefleri (Anonim, 2019):

- 2015: 130 g/km
- 2020/21: 95 g/km (2020 yılında filonun %95'i, 2021 yılında tamamı olmak üzere)
- 2025: ~ 81 g/km
- 2030: ~ 59 g/km

Yeni üretilen hafif ticari taşıtlar için NEDC çevrimindeki karbon dioksit filo hedefleri:

- 2017: 175 g/km

- 2020: 147 g/km
- 2025: ~ 125 g/km
- 2030: ~ 101 g/km

2.4. Emisyon Testleri

Emisyon testleri, taşıtların yaşam döngüleri boyunca farklı aşamalarda uygulanmaktadır. Geliştirme fazında uygulanan testler dışındaki testler regülasyonlar ile kontrol altına alınan ve onay mercii tarafından denetlenen testlerdir.

- Geliştirme: Taşıtın geliştirme fazının farklı aşamalarında sanal testler-simülasyonlar, motor testleri, dinamometre testleri ve yol testleri gibi çeşitli testler gerçekleştirilir. Bunlar zorunlu testler olmayıp, hedeflenen emisyon seviyelerine ulaşabilmek için yapılan çalışmalardır.
- Homologasyon / Tip Onay (TA): Geliştirme fazı tamamlanıp taşıt hazır olduktan sonra taşıtın trafiğe tescil edilebilmesi için teknik yasal şartları sağlıyor olması gerekir. Bu teknik yasal şartların uygunluğunu belgeleme işlemine homologasyon / tip onay (TA) süreci denir. Emisyon testleri bu sürecin aşamalarından bir tanesidir. Emisyon anlamında ortaklaştırılmış her bir taşıt ailesi için en kapsamlı testler bu aşamada gerçekleşir.
- Üretim Doğrulama (CoP): Homologasyon süreci tamamlanmış, tip onay belgesine sahip bir taşıtın üretim fazında da üretici tarafından belirli periyotlarda, hali hazırda uymuş olduğu emisyon limitlerine uymaya devam ettiği, üretim doğrulama (COP) testleri ile teyit edilir.
- Kullanım Uygunluğu (ISC): Satışı gerçekleşip kullanılmaya başlayan taşıtlar belli periyotlarda üretici tarafından takip edilip emisyon limitlerine uymaya devam edip etmedikleri kontrol edilir. Bu aşamada bağımsız laboratuvarların da bu kontrolleri yapıp, belirli seviyelerde üreticiyi denetleme yetkisi vardır.

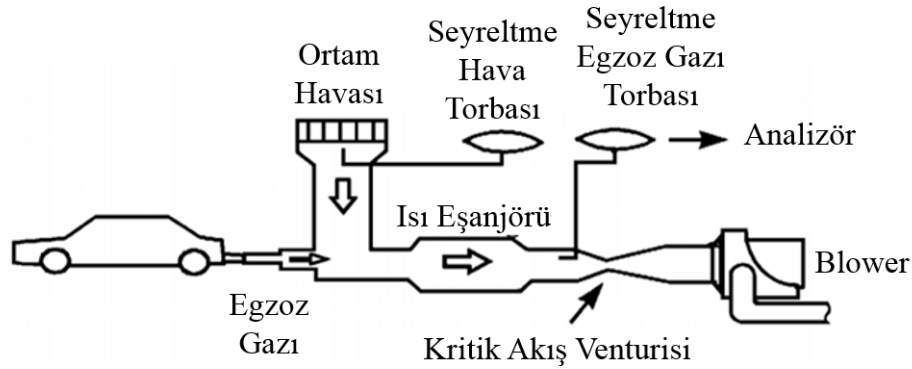
Bunlar dışında kalan, üretici kontrolünde olmayıp, kullanıcının belirli periyotlarda yaptırması gereken bazı emisyon testleri ve kontrolleri vardır. Bunlara periyodik muayene denir.

2.5. Egzoz Emisyonu Ölçüm Yöntemleri

Egzoz emisyonları taşıt egzozunun çıkışından alınan örnekleme yöntemi ile ölçülür. Örneklemenin amacı; ölçümü yapacak olan analizörlerin veya diğer ölçüm sistemlerinin kriterlerini sağlamak için numuneye sıcaklık, konsantrasyon, nem ve uçucu maddeler açısından ön koşullandırma sağlamaktır. Kullanılan iki ana emisyon ölçüm yöntemi vardır: seyreltilmiş ölçüm ve ham ölçüm.

2.5.1. Seyreltilmiş ölçüm

Şasi dinamometresindeki emisyon testleri, temel anlamda, taşıtın şasi dinamometresi üzerinde belirli bir çevrimde kullanıldığı ve bu çevrim boyunca egzoz çıkışından alınan örneklemenin egzoz hatları aracılığıyla ölçüm sistemlerine ulaştırıldığı bir sistem kullanımını gerektirir (Şekil 2.3). Bu tarz bir sistemde seyreltmenin amacı; egzoz gazının, egzoz hatlarındaki yoğuşmasını, dolayısıyla yanlış bir ölçümü önlemek ve daha kolay ve standart bir örnekleme ile ölçüm yapabilmektir. Seyreltilmiş ölçüm yöntemi, Sabit Hacim Örnekleme (CVS) sistemi tarafından kontrol edilir. Taşıttan alınan değişken hacimli egzoz gazı, ortam havası ile dengelenerek seyreltilir ve ventüriler yardımıyla ölçüm sistemlerine her zaman sabit akış sağlanır (Asano).



Şekil 2.5. Seyreltilmiş ölçüm yöntemi

2.5.2. Ham Ölçüm

Ham ölçümde egzozdan alınan örnekleme direkt olarak ölçüm sistemlerine gönderilir ve ölçüm gerçekleştirilir. RDE testinde egzoz gazları örnekleme yapıldıktan sonra direkt

olarak ölçüm sistemlerine gönderilebildiği için bu şekilde bir ölçüm gerçekleştirilir (Ninawe, 2015).

2.6. Tip 1: Egzoz Emisyonu Testi (WLTP)

Taşıtın şasi dinamometresi üzerinde, belirli bir çevrim boyunca kullanıldığı ve bu çevrim sonunda egzoz emisyonlarının belirlendiği en temel emisyon testidir. Seyreltilmiş ölçüm yöntemi kullanılır.

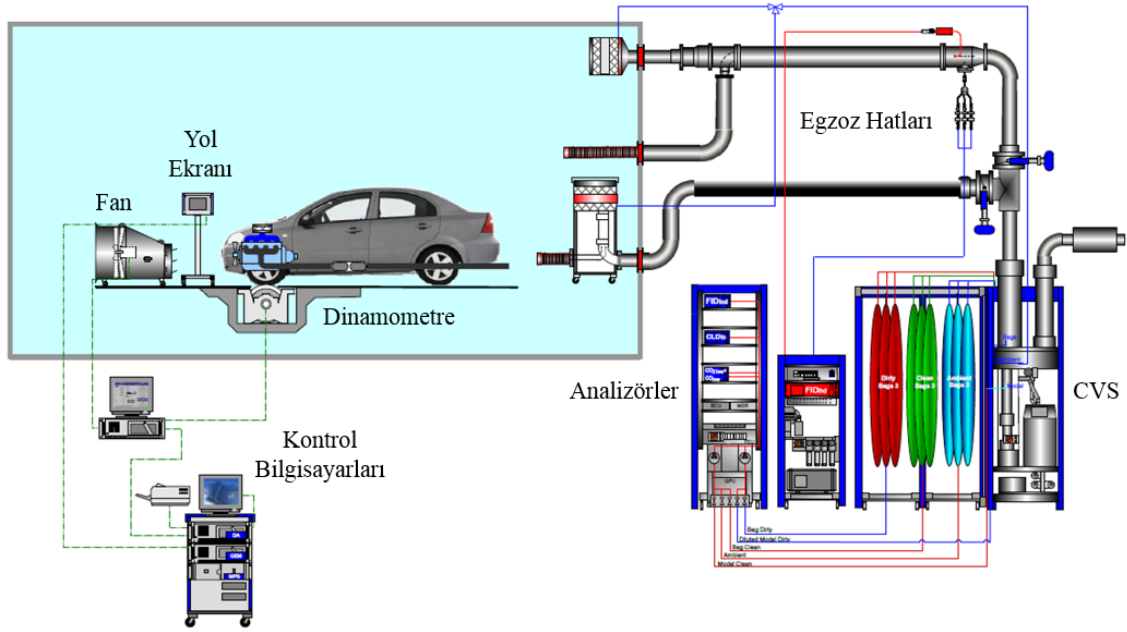
Tip 1: egzoz emisyonu testi, aslında farklı çevrimler ve prosedürler ile yapılabilse de güncel Avrupa standardında adlandırıldığı gibi tez boyunca WLTP olarak adlandırılacaktır.

2.6.1. Test ekipmanları

WLTP test ekipmanları Şekil 2.4'teki gibidir:

- **Dinamometre:** Taşıt, çevrim boyunca şasi dinamometresi üzerinde sürülür. Taşıt özelinde belirlenen ve gerçek sürüş koşullarındaki yuvarlanma direnci, sürtünme direnci ve aerodinamik direnci temsil eden yol yükü değerleri (f_0 , f_1 , f_2) sisteme girilir ve dinamometre test boyunca gerekli yol kuvvetlerini taşıta uygular.
- **Yol ekranı:** Taşıtın koşması istenen çevrim sistemde tanımlanır ve yol ekranı ile sürücüye gösterilir. Sürücü, ekrandaki hız profilini, toleranslar içerisinde kalmaya çalışarak takip eder.
- **Fan (Blower):** Taşıt ve haliyle motor, çevrim boyunca farklı hızlarda çalıştığından soğutulması gereklidir. Taşıtın önüne konumlandırılan fan, dinamometreden hız bilgisini alarak anlık olarak taşıta değişken debilerde hava akışı sağlar ve sürüşün normal yol koşullarında olduğu gibi gerçekleşmesine yardımcı olur.
- **Egzoz hatları:** Egzoz gazının taşındığı, taşıtın egzoz çıkışına bağlanan hortumlardan CVS'e gidene kadarki borulara egzoz hatları denir.
- **CVS:** Taşıttan çıkan egzoz gazı, egzoz hatlarında ortam havası ile seyreltikten sonra analizörlere gönderilir.

- Analizörler: Egzoz gazlarının analiz edilip miktarlarının belirlendiği ekipmanlardır. CO & CO₂, HC & CH₄, NO_x ve partikül ölçümleri için 4 farklı analizör kullanılır. Yöntemine göre bazı analizörler operasyon gazlarına ihtiyaç duyarlar.
- Kontrol bilgisayarları: Bütün sistemin kontrollerinin yapıldığı ve testin takip edildiği bilgisayarlardır.



Şekil 2.6. Tip 1: egzoz emisyonu testi ekipmanları

2.6.2. Test çevrimi (WLTC)

Taşıt, egzoz emisyon testi boyunca regülasyonda belirlenen standart bir çevrimde koşturulur. Bu sayede Avrupa standardına uyan her taşıtın aynı çevrimde hangi emisyon ve yakıt tüketim değerlerine sahip olduğu karşılaştırılabilir. Çevrimler hız zaman profili olarak kendi içinde alt çevrimlerden oluşur. Taşıt ağırlık ve maksimum hızlarına göre hangi kombinasyonun kullanılması gerektiği belirlenir. Çevrim sadece hız profilinden oluşup, yönden bağımsız olduğu için, test esnasında pedalları ve vitesi kullanmak yeterlidir, direksiyona ihtiyaç duyulmaz. Avrupa standardında test çevrimi olarak, Euro 6C emisyon seviyesine kadar NEDC kullanılırken, Euro 6C ile beraber WLTC'ye geçilmiştir. WLTC, NEDC'ye göre daha yüksek hızlara sahip, daha uzun ve daha agresif

kullanım koşullarına sahip olduğundan, normal sürüşe daha yakın bir çevrimdir. WLTC çevrimi; taşıtın nominal gücünün boş ağırlığına oranına (PMR) ve ulaşabileceği maksimum hıza (V_{max}) bağlı olarak farklı alt fazlardan oluşur (Çizelge 2.3) (Mock vd., 2014).

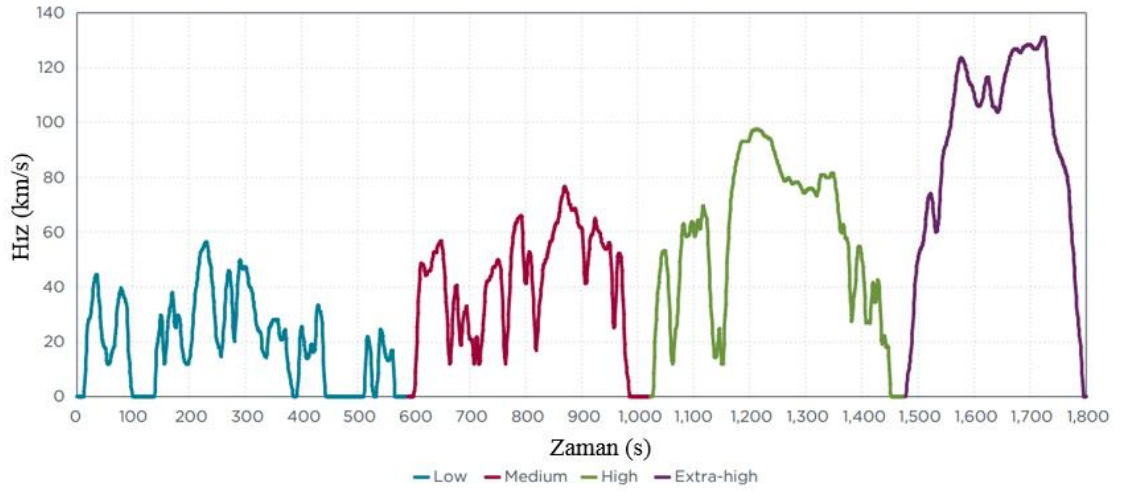
Çizelge 2.3. WLTC fazları (Anonim, 2017)

Kategori	PMR [W/kg]	V_{max} [km/s]	WLTC Fazları
Class 1	$PMR \leq 22$	-	Low 1 + Medium 1 + Low 1
Class 2	$34 \geq PMR > 22$	-	Low 2 + Medium 2 + High 2 + Extra High 2
Class 3a	$PMR > 34$	$V_{max} < 120$	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3
Class 3b	$PMR > 34$	$V_{max} \geq 120$	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3

Günümüzde kullanılan birçok binek ve hafif ticari taşıtın dahil olduğu Class 3b sınıfının WLTC çevrimi (Şekil 2.5) detayları Çizelge 2.4'teki gibidir:

Çizelge 2.4. Class 3b sınıfı taşıtların WLTC test şartları (Anonim, 2017)

Test Başlangıcı:	Soğuk ($23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
Süre:	1800 s / 30 dak
Mesafe:	23,27 km
Ortalama Hız:	46,5 km/s
Maksimum Hız:	131,3 km/s
Duruş Süresi:	226 s
Sabit Hız Süresi:	66 s
Hızlanma Süresi:	789 s
Yavaşlama Süresi:	719 s



Şekil 2.7. Class 3b taşıtları WLTC çevrimi

2.6.3. Test prosedürü

WLTC test prosedürü, Commission Regulation 2017/1151’de (Anonim, 2017) belirtildiği üzere aşağıdaki gibidir:

- Taşıta, tanımlanmış referans yakıt doldurulur.
- Test öncesi taşıtın genel kontrolleri yapılır ve belirli bir mesafe sürülür. Taşıtın motor-yakıt türüne göre, ihtiyaç halinde rejenerasyon yaptırılır.
- Taşıtın ağırlık ve güç aktarma sistemi konfigürasyonuna göre belirlenen yol yükleri coast down metodu ile test öncesi dinamometreye tanımlanır.
- Taşıt, egzoz emisyon testi öncesi analiz yapılmaksızın bir kere belirlenen çevrimde koşturulur. Buna ön test denir.
- Ön testten çıkan taşıt 6 ila 36 saat arasında, $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığında bütün taşıt bileşenlerinin aynı sıcaklığa gelmesi amacıyla şartlandırılır.
- Şartlanması tamamlanan taşıt, çalıştırılmaksızın dinamometre üzerine yerleştirilir ve $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığında, belirlenen çevrimde emisyon testi gerçekleştirilir.

2.6.4. Test sonucu

Test sonucunda, çevrim boyunca taşıt tarafından salınan egzoz emisyonları ve yakıt tüketim değerleri alınır. WLTC özelinde 4 fazın her biri için ayrı ayrı ve toplam olmak

üzere 5 farklı sonuç elde edilir. Toplam sonucun, taşıtın mevcut emisyon limitlerine (Çizelge 2.5) uyması beklenir.

Çizelge 2.5. M1 & N1 Class 1, N1 Class 2 ve N1 Class 3 için Euro 6D emisyon limitleri (Anonim, 2017)

		M & N1 Class 1	N1 Class 2	N1 Class 3
THC ⁽¹⁾ (mg/km)	Benzin	100	130	160
	Dizel	-	-	-
NMHC ⁽²⁾ (mg/km)	Benzin	68	90	108
	Dizel	-	-	-
NO _x (mg/km)	Benzin	60	75	82
	Dizel	80	105	125
HC+NO _x (mg/km)	Benzin	-	-	-
	Dizel	170	195	215
CO (mg/km)	Benzin	1000	1810	2270
	Dizel	500	630	740
PM ⁽³⁾ (mg/km)	Benzin	4,5	4,5	4,5
	Dizel	4,5	4,5	4,5
PN ⁽³⁾ (#/km)	Benzin	6E+11	6E+11	6E+11
	Dizel	6E+11	6E+11	6E+11
(1): Total HC				
(2): Non-Metal HC				
(3): Benzinli taşıtların sadece GDI motora sahip olanları için				

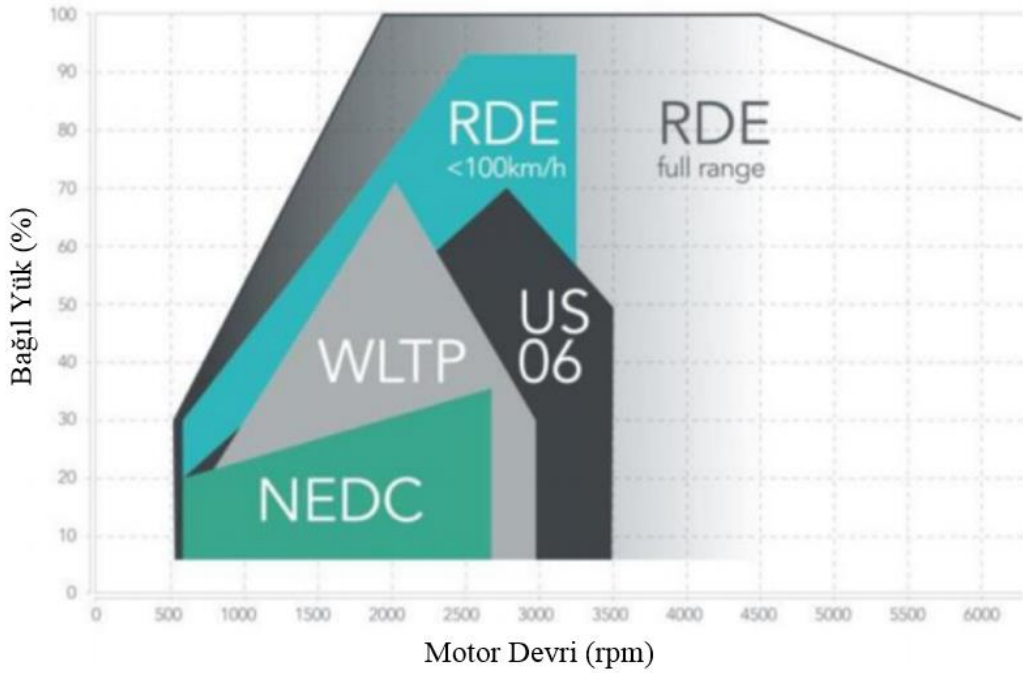
Diğer egzoz emisyonları gibi direkt olarak taşıt özelinde yasal limitlere sahip olmayan fakat taşıtlar için WLTP testinde ölçülen bazı değerler vardır:

- CO₂, diğer kirleticiler gibi analizör aracılığıyla ölçülür ve test sonucunda yer alır. CO₂'in taşıt özelinde limiti olmayıp, her taşıtın toplu hesabının yapıldığı filo ortalaması ve limitler söz konusudur.
- CO₂ ile paralel olarak, test sonucunda ve homologasyon raporunda deklare edilen fakat herhangi bir limiti olmayan diğer bir değer ise yakıt tüketimidir. Yakıt tüketimi, emisyon testinde ölçülen kirleticiler aracılığıyla hesaplanır ve l/100 km cinsinden rapor edilir.

2.7. Tip 1A: Gerçek Sürüş Emisyonları Testi (RDE)

Son yıllarda, WLTP testi ile beraber önemi gün geçtikçe artan bir diğer test de gerçek sürüş emisyonları (RDE) testidir. RDE testi iki temel nedenden dolayı önem kazanmıştır:

- WLTP testi laboratuvar koşullarında, standart bir kapalı ortamda gerçekleştirilir. Çevrimler ile hız profilleri iyileştirilip gerçeğe daha yakın test konfigürasyonu yaratılmaya çalışılsa da gerçek yol şartlarında emisyonlara etki eden fakat laboratuvarında uygulanması mümkün olmayan trafik, sıcaklık ve rakım değişiklikleri, değişken yol eğim ve kuvvetleri, gerçeğe daha uygun şehir içi-şehir dışı-otoban şartlarında kullanım gibi avantajlarından ötürü testi gerçek yol şartlarında gerçekleştirmek, motorun çok daha geniş yük alanlarını (Şekil 2.6) temsil edeceğinden daha uygundur.
- Taşıtın saldıdığı emisyon değerlerini olduğundan az gösterebilecek ya da farklı avantajlar sağlayabilecek yanıtıcı cihazlar, emisyon regülasyonları tarafından gün geçtikçe daha sıkı bir şekilde takip edilip, kullanımları yasaklanmaktadır. Gerçek yol şartlarında bu gibi cihazların tespit edilmesi daha kolaydır.

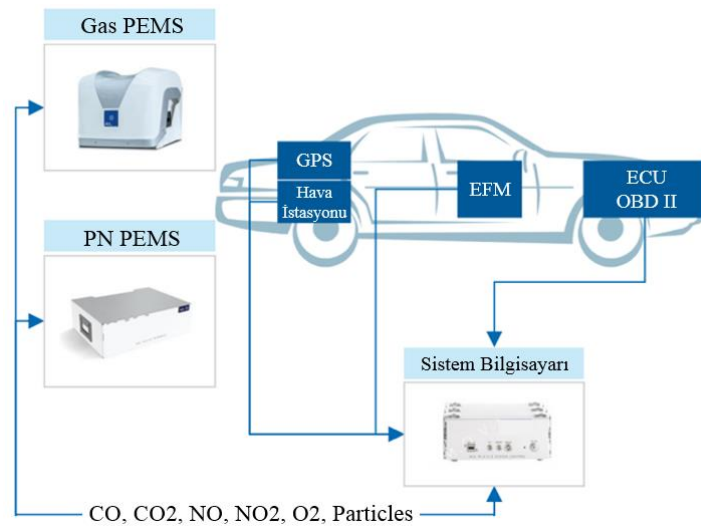


Şekil 2.8. Farklı çevrimlerin yük-devir haritası

2.7.1. Test ekipmanları

RDE testi, egzoz borusu çıkışından itibaren ölçüm alan ve taşıt ile beraber hareket halinde çalışabilen portatif bir emisyon ölçüm cihazıyla (PEMS) gerçekleştirilir. RDE test ekipmanları detayları Şekil 2.7'deki gibidir.

- Egzoz Debi Ölçer (EFM): Taşıtın egzoz borusuna takılan egzoz hattı üzerinde EFM cihazı bulunur. Burada egzoz gazının debisi ölçülür ve ölçüm sonrasında hattan alınan örnekleme ile egzoz gazı ilgili analizörlere gönderilir.
- Gas PEMS: Güncel regülasyon gereği, hafif yolcu taşıtlarında uygulanan RDE testinde CO, CO₂, NO_x ve PN emisyonları ölçülür. HC ölçümünde operasyon gazı olarak hidrojene ihtiyaç duyulduğundan ve hidrojen tüpünün taşıtta taşınması tehlike yaratabileceğinden, HC emisyonları hafif yolcu taşıtları RDE testleri kapsamında ölçülmez. Egzoz gazından alınan örnekleme farklı hatlar ile ikiye ayrılır. Gas PEMS cihazına giden hattan CO, CO₂ ve NO_x gazlarının ölçümü yapılır ve gram cinsinden raporlanır.
- PN PEMS: Örneklemenin ikinci hattı ise PN PEMS cihazına gönderilir ve burada 23nm altındaki partiküller sayılır ve miktar cinsinden raporlanır.
- Sistem Bilgisayarı: Testin takip edildiği ve test ile alakalı bütün işlemlerin gerçekleştiği bilgisayardır. PEMS ekipmanları dışında taşıttan da anlık olarak testte ihtiyaç duyulan motor devri, motor sıcaklığı gibi bilgileri CAN hattı üzerinden toplar.
- GPS: Taşıtın test esnasındaki rotasının ve rakımının takip edilmesi için GPS cihazı kullanılır. Taşıtın en üstüne konumlandırılır.
- Hava İstasyonu: Sıcaklık ve nem bilgisi anlık olarak bu cihazdan ölçülür. Taşıtın en üstüne konumlandırılır.



Şekil 2.9. RDE testi ekipmanları

2.7.2. Test çevrimi

RDE test çevrimi, WLTP testi gibi standart bir hız profiline sahip değildir. Test boyunca taşıtın uyması gereken bütün limitler tanımlanmıştır. Bu limitlere; süre, hız, sıcaklık, rakım, ivmelenme gibi birçok parametre dahildir. Bu limitler arasında kalan her test konfigürasyonu geçerli sayılır. Tekrarlanabilirlik açısından önceden belirlenen ve uygunluğuna emin olunan bir test rotası seçilir. Test çevrimi farklı hız limitleri ile belirlenmiş üç ayrı fazdan oluşur. 60 km/s hıza kadar şehir içi, 60-90 km/s arası şehir dışı, 90 km/s hızdan sonra otoban fazı olarak adlandırılır. Test sonucunda şehir içi fazının ve bütün test ortalamasının emisyonların limitlere uyması gerekir (International Council on Clean Transportation, 2017).

2.7.3. Test prosedürü

RDE testi, Commission Regulation 2017/1151'ye (Anonim, 2017) göre, taşıt motor suyu sıcaklığına göre iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir:

- Soğuk Test: Taşıt ilk önce, en az yarım saat sürecek şekilde herhangi bir limite tabi olmaksızın sürülür (ön test). Burada amaç; test esnasında karşılaşılabilecek sorunları ya da rejenerasyon gibi işlemleri test öncesinde ortadan kaldırmaktır. Daha sonra taşıt 6 ila 54 saat arasında, 0-30 °C sıcaklıktaki bir ortamda şartlandırmaya bırakılır. Şartlandırmadan sonraki ana test öncesinde, başta analizörler olmak üzere PEMS cihazının ölçüm doğruluğundan emin olmak adına taşıt çalıştırılmaksızın referans gazlar ile kalibrasyon işlemi gerçekleştirilir (pre-test). Ana testte taşıt çalıştırıldığı andan itibaren test başlanmış olur. Motor suyu sıcaklığı 70 °C'ye ulaşana kadarki periyota "soğuk başlangıç" periyodu denir. Soğuk testteki amaç bu periyotta, yüksek seviyedeki emisyonları test etmektir. Ana test tamamlandıktan sonra, referans gazlar ile bir doğrulama gerçekleştirilir (post-test). Buradaki amaç; ana test boyunca PEMS cihazının yaptığı ölçüm sapmalarının regülasyon tarafından izin verilen değerler içerisinde olup olmadığının kontrol edilmesidir.
- Sıcak Test: Taşıt önceden sürülmeksizin ve şartlandırılmaya bırakılmaksızın, motor suyu sıcaklığı en az 70 °C olması şartı ile ana teste başlanır. Sıcak testte de

soğuk testte olduğu gibi ana testin öncesinde ve sonrasında referans gazlar ile doğrulamalar gerçekleştirilir.

Soğuk ve sıcak testlerinden hangilerinin yapılacağı, taşıtın üyesi olduğu taşıt ailesi kriterlerine göre göre regülasyon tarafından belirlenmektedir.

2.7.4. Test sonucu

RDE testinde taşıtların teorik olarak WLTP testindeki limitlere aynı şekilde uyması gerekir. Aradaki tek fark; PEMS cihazının son yıllarda kullanıma başlanan görece yeni ve kompleks bir cihaz olmasından kaynaklanan ölçüm belirsizliklerini geçiş sürecinde karşılayabilmesi için ve üreticilere laboratuvar ve gerçek sürüş koşullarındaki farkı kapatmak için belirli bir zaman tanımak adına her kirletici için farklı uygunluk faktörleri (CF) tanımlanmış olmasıdır. Taşıtın RDE testinde, her kirletici özelinde bu faktörler ile çarpılmış emisyon limitlerine uyması gerekir (Çizelge 2.6). Güncel regülasyonda (Euro 6) NO_x ve PN emisyonları için bu limitler uygulanırken, CO emisyonu için sadece ölçüm istenmektedir, herhangi bir CF söz konusu değildir (International Council on Clean Transportation, 2017).

Çizelge 2.6. RDE emisyon limitleri (Anonim, 2017)

	WLTP Limit			CF		RDE Limit		
	NO _x [mg/km]		PN [#/km]	CF NO _x	CF PN	NO _x [mg/km]		PN [#/km]
	Benzin	Dizel	Benzin & Dizel			Benzin	Dizel	Benzin & Dizel
Euro 6D-Temp	60	80	6,00E+11	2,1	1,5	126	168	9,00E+11
Euro 6D-Final	60	80	6,00E+11	1,43	1,5	85,8	114,4	9,00E+11

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Çalışmanın Amacı

Bölüm 2.7’de bahsedildiği gibi RDE testi; taşıtların gerçek yol şartlarındaki emisyonlarının ölçüldüğü ve NOx ve partikül emisyonlarının, farklı uygunluk faktörleri ile çarpılmış WLTP testi limitlerinin altında kalması gerektiği testtir. Euro 6 emisyon seviyesinde; taşıtın tip onay aşamasında yapılması zorunlu olan RDE testinin, gelecek yıllarda daha aktif bir şekilde ve taşıtın yaşam döngüsünün farklı fazlarında kullanılması beklenmektedir. Yasal zorunlulukların yanı sıra; birçok Avrupa ülkesi, başta başkentler ve yoğun nüfuslu şehir merkezleri olmak üzere bazı bölgelere yüksek emisyonlu taşıtların girmesini yasaklamaya başlamıştır (Wappelhorst, 2020). Bu bölgelere giriş kriterlerini belirlerken de taşıtların RDE test sonuçlarına göre bir sınıflandırmanın yapıldığı durumlar söz konusudur. Bu gibi gelişmeler neticesinde RDE testinin gün geçtikçe önem kazanacağını ve test sayılarının artacağını söylemek mümkündür.

Taşıt emisyonlarını gerçek sürüş şartlarında daha gerçekçi bir şekilde ölçüp, insan sağlığına ve çevreye dolaylı yoldan katkı sağlasa da RDE testi, başta üreticiler olmak üzere otomotiv sektörü için farklı zorluklara sahiptir. Test şartlarının WLTP testine göre daha kapsamlı ve test süresinin uzun olması, testi gerçekleştirirken gerçek yol şartlarında karşılaşılabilecek riskler, zorlu yol ve hava şartlarında test gerçekleştirilememesi durumu ve olası test iptallerinde harcanan emek ve zamanın boşa çıkması RDE testinin başlıca zorluklarından biridir (Bodisco ve Zare, 2019).

Tez kapsamında, bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, RDE testlerinin laboratuvar şartlarında temsil edilmesi incelenecek, seçilmiş taşıt ile gerçek yol şartlarında gerçekleştirilen RDE testi laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmeye çalışılacak ve 4. Bölümde sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

3.2. Yöntem

WLTP testi ve RDE testi, detayları Bölüm 2.6 ve 2.7’de incelendiği gibi farklı test prosedürlerinde gerçekleştirilmektedir. Bu prosedür farklılıkları göz önüne alındığında

bu iki testin karşılaştırılması veya birbirlerinin yerine değerlendirilmesi her zaman tutarlı sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle tez kapsamında iki test prosedürü direkt olarak karşılaştırılmaktansa; RDE test prosedürleri baz alınıp, bu testin laboratuvar ortamında nasıl gerçekleştirilebileceği çalışılacaktır. Bu yaparken de iki prosedür arasındaki farklılıklar minimum seviyeye indirilmeye çalışılacak, RDE testi mümkün olduğu kadar laboratuvar ortamında temsil edilmeye çalışılacaktır.

3.3. Taşıt Seçimi

Testlerde, test sonuçlarının uygun bir şekilde karşılaştırılıp incelenebilmesi için, emisyon laboratuvarında referans taşıt olarak kullanılan benzinli binek bir taşıt kullanılmıştır. Testlere 13.500 km başlayan referans taşıtın teknik özellikleri Çizelge 3.1'deki gibidir.

Çizelge 3.1. Referans taşıtın özellikleri

Yakıt Tipi:	Benzin
Silindir Sayısı:	4
Valf Sayısı:	16
Ekzantrik Tipi:	DOHC
Çap X Strok:	72 mm x 84 mm
Silindir Hacmi:	1,368 cc
Sıkıştırma Oranı:	11,2 : 1
Azami Güç:	95 BG (70 kW) / 6.000 d/dak
Azami Tork:	127 Nm / 4.500 d/dak
Yakıt Besleme:	Çok Noktalı Püskürtme (MPI)
Emisyon Sınıfı:	Euro 6D-Temp
Çekiş:	Önden
Vites Tipi:	Manuel
Vites Sayısı:	6 İleri
Boş Ağırlık:	1.195 kg

Taşıtta emisyon azaltıcı sistem olarak üç yollu katalitik konvertör (TWC) bulunur. TWC; egzoz sıcaklığı yaklaşık 300 °C olduktan sonra etkin duruma geçer. Bu sıcaklıkta oldukça ekzoterm olan oksitlenme reaksiyonlarının başlanması ve katalizörün ısı iletim kat sayısının oldukça düşük olması, sistem sıcaklığını kısa sürede 850-1000 °C seviyesine çıkarır. HC, CO ve NOx molekülleri, TWC'ün taşıyıcı matrisinin kanallarından geçerken ara tabaka gözeneklerinde tutulmakta ve soy metal tabakası (platin, paladyum, rhodium

vb.) yüzeyinde oksitlenme ve indirgenme reaksiyonları ile CO₂, N₂ ve H₂O'ya dönüştürülerek dışarı atılır (Pulkrabek, 2004).

3.4. Test Çevrimleri

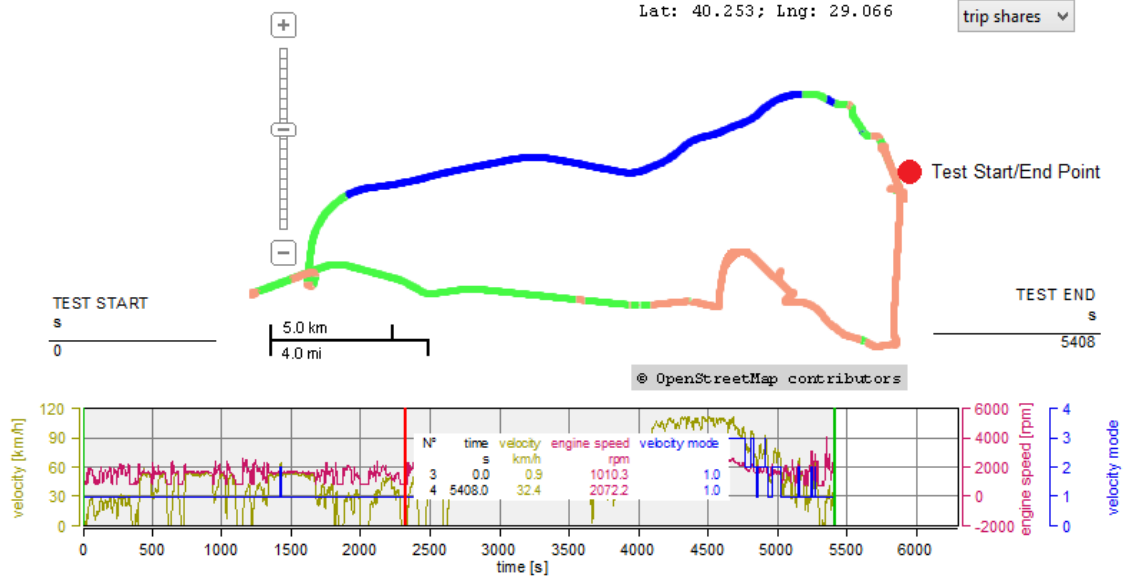
3.4.1. RDE testi çevrimi

RDE testi, WLTP testi gibi standart laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmediği için standart çevrimler gibi net değerlere sahip bir çevrimde gerçekleştirilmez. Bunun yerine, taşıtın gerçek sürüş şartlarında uyması gereken bazı aralıklar belirlenmiştir. Çizelge 3.2'de detayları belirtilen bu aralıklar ve koşulları sağlayan her çevrim geçerli sayılır.

Çizelge 3.2. RDE testi limitleri (Anonim, 2017)

	Toplam	Şehir İçi	Şehir Dışı	Otoban
Test Başlangıcı:	Soğuk: Sıcaklık şartlarına uygun şekilde	-	-	-
	Sıcak: > 70 °C			
Süre:	90 – 120 dk	-	-	-
Mesafe:	-	> 16 km	> 16 km	> 16 km
Dağılım:	% 100	% 29 - 44	% 23 - 43	% 23 - 43
Hız:	0 – 145 km/s	≤ 60 km/s	> 60 km/s ve ≤ 90 km/s	> 90 km/s
	145 – 160 km/s arası, otoban fazının %3'ünü geçmemek şartı ile	Ortalama Hız: 15–40 km/s	-	-
	0 – 1 km/s arası, şehir içi fazının % 6 – 30 arası kalması şartı ile			
	100 km/s üzeri min. 5 dak sürüş			
Duruş Süresi:	< 300 s			
Sıcaklık:	Normal: ≥ 0 °C ve ≤ 30 °C	-	-	-
	Aşırı: (≥ -7 °C ve < 0 °C) ya da (> 30 °C ve ≤ 35 °C)			
Rakım:	Normal: 0 – 700 m	-	-	-
	Aşırı: 700 – 1300 m			
	Test başlangıç – bitiş farkı: < 100 m			

Tez kapsamında gerçekleştirilen RDE testleri; Bursa şehrinde, önceden belirlenmiş bir test rotasında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Rota, regülasyona uygun olarak; sırasıyla şehir içi, şehir dışı ve otopan fazlarında oluşmakta ve aynı noktada başlayıp, sonlanmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. RDE test rotası faz gösterimi

3.4.2. RDE laboratuvar temsil çevrimi (LTÇ)

Tez kapsamında gerçekleştirilen RDE laboratuvar temsil çevrimi (LTÇ); regülasyonda belirtilen standart bir çevrim olmayıp, WLTP testi baz alınarak oluşturulan ve her bir RDE testinde GPS'ten alınan hız ve zaman verileri ile yolda gidilen yolun laboratuvarında temsil edilmiş hallerinden meydana getirilmiş test konfigürasyonundan oluşur. Bu şekilde taşıt, yolda gerçekleştirdiği çevrimi dinamometre üzerinde birebir tekrarlamış olur ve trafik etkisi ortadan kaldırılarak, aynı hız-zaman profillerinde direkt bir karşılaştırma yapılabilir.

Referans alınan RDE testlerinde, yaklaşık 80 km uzunluğundaki rota boyunca gerçekleşen fazların hız dağılımları, süre gibi parametreler, başta trafiğin durumu olmak üzere testi etkileyen değişkenler tarafından, testin geçerliliğini koruyacak şekilde

değişkenlik göstermiştir. Laboratuvar testlerinde ise, her bir RDE testine ait spesifik çevrimler RDE laboratuvar temsil çevriminde birebir tekrar edilmiştir.

3.5. Emisyon Ölçüm Cihazı

Bölüm 2.5'te bahsedildiği gibi, farklı emisyon testleri farklı ölçüm yöntemlerini kullanılır. WLTP testinde seyreltilmiş ölçüm yöntemi kullanılırken, RDE testinde ise ölçüm sistemine bağlı olarak hem seyreltilmiş hem ham ölçüm yöntemi kullanılır.

Tez kapsamında, ölçüm yöntemlerinden doğan farklılıkları elemek adına her iki çevrimde de PEMS cihazı kullanılacaktır. WLTP testinde kullanılan ölçüm sistemleri devre dışı bırakılacak, taşıt dinamometrede PEMS cihazı takılı olarak LTÇ'ni koşacak ve her iki test durumunda da aynı ölçüm sistemi kullanılacağından daha doğru bir karşılaştırma imkânı sağlanacaktır.

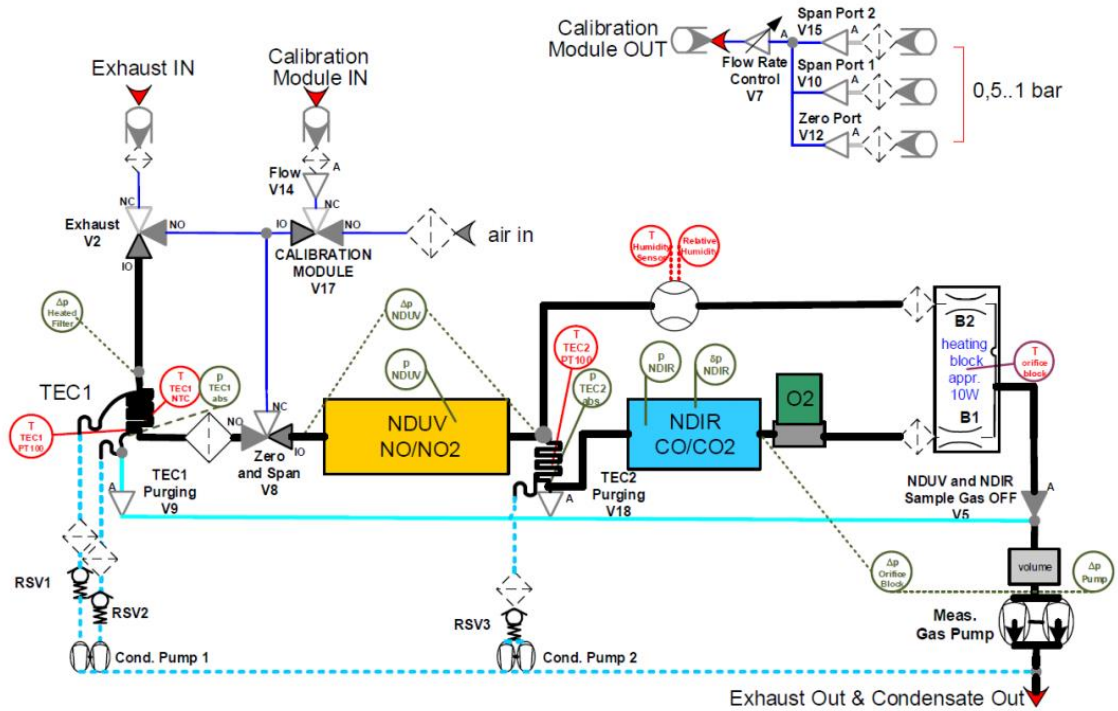
PEMS cihazında farklı emisyon gazları için iki ayrı ölçüm sistemi ve bunlara bağlı toplamda üç ayrı analizör bulunur. CO ve CO₂ gazları ölçümünü gerçekleştiren Non-dispersive Infrared Analyzer (NDIR) analizörü ve NO ve NO₂ gazları ölçümünü gerçekleştiren Non-dispersive Ultraviolet (NDUV) analizörü, Gas PEMS ölçüm sisteminde bulunur. Partikül sayımı için ise PN PEMS ölçüm sisteminin kendisi bir analizör olarak çalışır.

3.5.1. Gas PEMS ölçüm sistemi

AVL Gas PEMS iS User Manual'de (2016) belirtildiği üzere, örnekleme ile alınan ham egzoz gazı, yoğuşmayı önleme amacıyla yaklaşık 100 °C'deki ısıtılmış hat vasıtasıyla sisteme aktarılır. Hat sonundaki filtre, egzoz gazındaki partikülleri filtreler ve filtrelenmiş gaz önce NDUV analizörüne yönlendirilir. Egzoz gazı, TEC1 bölmesinde NDUV analizörü çalışma sıcaklığı olan yaklaşık 25 °C'ye soğutulur ve yoğuşan su ayrı bir hat ile sistemden uzaklaştırılır.

Örnekleme ile alınan ham egzoz gazı, yoğuşmayı önleme amacıyla yaklaşık 100 °C'deki ısıtılmış hat vasıtasıyla sisteme aktarılır. Hat sonundaki filtre, egzoz gazındaki partikülleri

filtreler ve filtrelenmiş gaz sistemdeki ilk soğutucuda soğutulurak NO ve NO₂ gazlarının ölçümü için NDUV analizöründen geçer. NDUV analizöründen çıkan gaz iki ayrı hatta bölünür. Birinde bypass akışı olarak yönlendirilirken, diğerinde ise ikinci soğutucuda tekrar soğutulurak CO ve CO₂ gazları ölçümü için önce NDIR analizörü, sonra O₂ sensöründen geçer. Hat sonunda birleşen gazlar ve yoğuşma sıvıları pompalar yardımıyla ölçüm sistemini terk eder. Sistemde gazlar ppm veya yüzdesel hacimde ölçülür (Şekil 3.3).



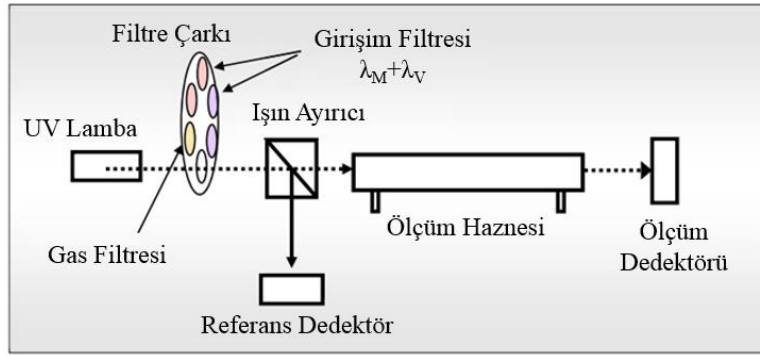
Şekil 3.3. Gas PEMS ölçüm sistemi

- NDUV (Non-dispersive Ultraviolet) analizörü:

NO ve NO₂ gazlarının direkt olarak ölçüldüğü analizördür. Ölçüm prensibi, radyasyonun NO ve NO₂ gazları tarafından absorbe edilmesine dayanır. UV ışın kaynağı olarak kullanılan elektrotsuz deşarj lambası (EDL), dalga boylarında radyasyon yayar:



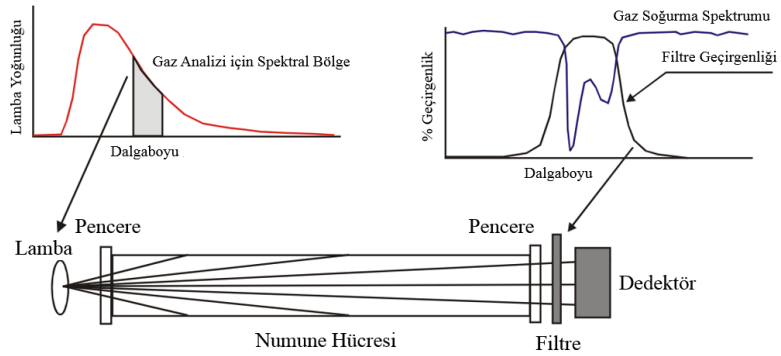
Ardından filtre çarkı, yalnızca 200 ila 500 nm aralığındaki NO spesifik dalga boylarının geçmesine izin verir. UV radyasyonu daha sonra ışın ayırıcıya ikiye ayrılır. Referans detektöre giden ışın doğrudan ölçülür. Ölçüm kuvvetine giren diğer ışın, bu bölmedeki NO tarafından emilir. Referans dedektörü ve ölçüm kuvveti arasındaki ölçüm farkı NO içeriğini ortaya çıkarır. NO₂ ölçümü için de benzer süreç, filtre çarkındaki diğer filtreler kullanılarak gerçekleştirilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. NDUV analizörü

- NDIR (Non-dispersive Infrared Analyzer) analizörü:

CO ve CO₂ gazlarının direkt olarak ölçüldüğü analizördür. NDUV analizörü ile benzer prensipte çalışır. NDIR analizöründe kızılötesi ışın kaynağı ile kızılötesi spektrometre teknikleri kullanılarak ölçüm yapılır. Tek ışınlı kızılötesi spektrometreler dört ana bölümden oluşur: radyasyon kaynağı, monokromatör, numune hücresi ve dedektör (Şekil 3.5).

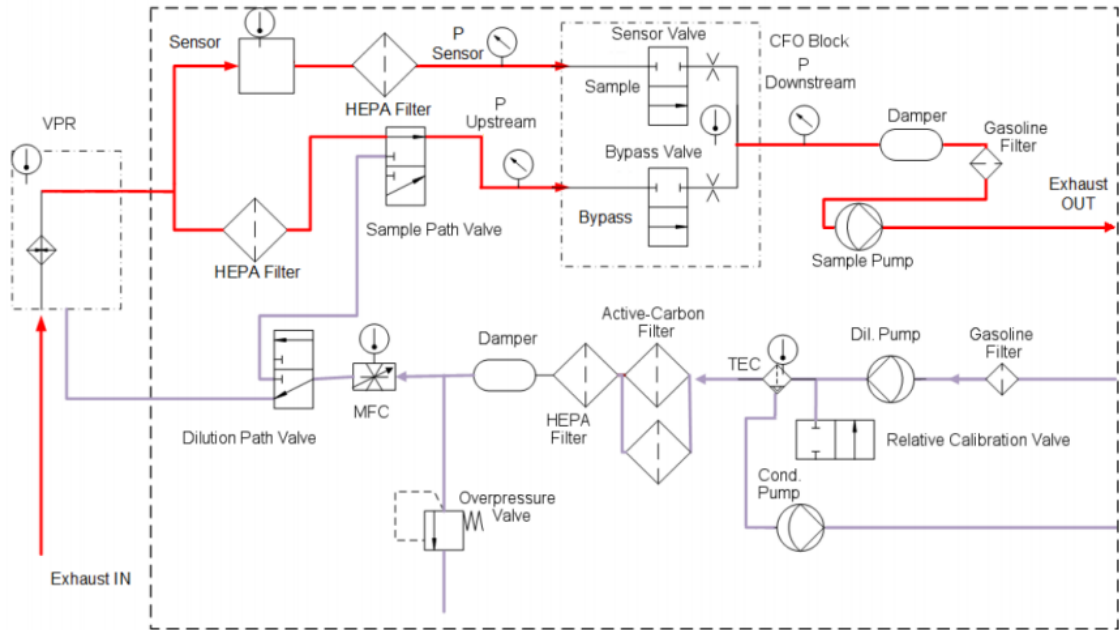


Şekil 3.5. NDIR analizörü

Kızılötesi kaynak yüksek sıcaklıklarda ışın üretir. Numune hücresinde meydana gelen kızılötesi radyasyon, analiz edilen gazın soğurma bandıyla spektral olarak örtüşür. Örnek gaz tarafından absorbe edilmeyen kızılötesi radyasyon, bir termopil detektörü kullanılarak bir elektrik sinyaline dönüştürülür ve ölçüm gerçekleştirilir.

3.5.2. PN PEMS ölçüm sistemi

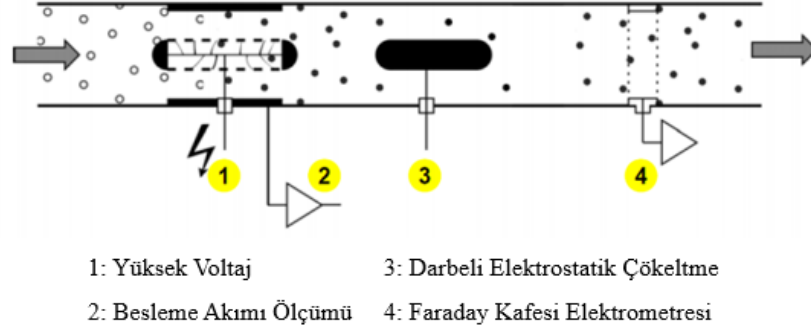
Partiküllerin ölçüldüğü PN PEMS ölçüm sistemi (Şekil 3.6), Gas PEMS ölçüm sisteminden farklı olarak, seyreltilmiş ölçüm yöntemini kullanır.



Şekil 3.6. PN PEMS ölçüm sistemi

AVL PN PEMS iS User Manual’de (2015) belirtildiği üzere, seyreltme oranını ayarlamak için bir kütle akış kontrolörü ile sisteme alınan ortam havası, seyreltme hattında (gri) filtrasyonlardan geçerek egzoz gazı ile karışır. Seyreltilmiş karışım, ölçümün yapılacağı örnekleme hattına (kırmızı) girmeden önce uçucu parçacıklardan elimine edilmesi için Uçucu Partikül Sökücü’ye (VPR) girer. Örnekleme hattı ikiye ayrılır. Biri bypass hattı olarak çalışır, diğeri ise difüzyon prensibiyle ölçümün gerçekleştiği sensör hattıdır. Bunun için gerekli olan pozitif yüklü iyonlar, akışın yüksek voltaja maruz kalmasıyla

oluşur. Yüklü parçacıklar Faraday Kafes'inden geçerek doğrudan partikül konsantrasyonu ile orantılı bir sinyal üretir ve ölçüm gerçekleşmiş olur (Şekil 3.7). Hat sonunda birleşen gazlar pompa yardımıyla ölçüm sistemini terk eder. Sistemde partiküller sayısal olarak ölçülür.



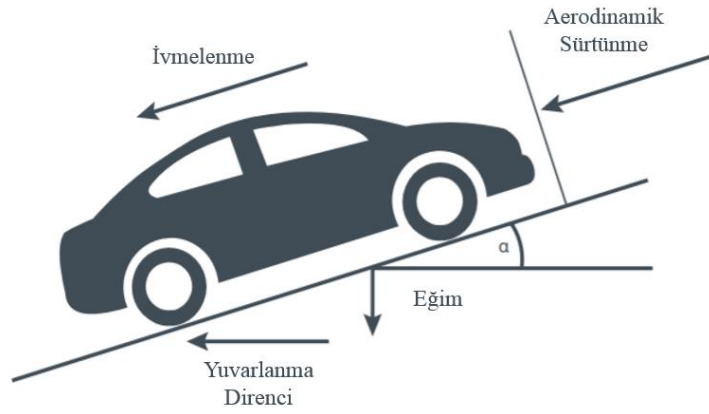
Şekil 3.7. PN PEMS partikül sayım hücresi

3.6. Başlangıç Şartları

RDE ve LTÇ testlerine soğuk başlangıç şartında başlanmıştır. Taşıt, sıcaklık ve nem şartlarının kontrolde tutulduğu şartlandırma odalarında $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta en az 6 saat şartlandırılmaya bırakılmış ve testler, WLTP testi ve RDE soğuk test prosedürlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

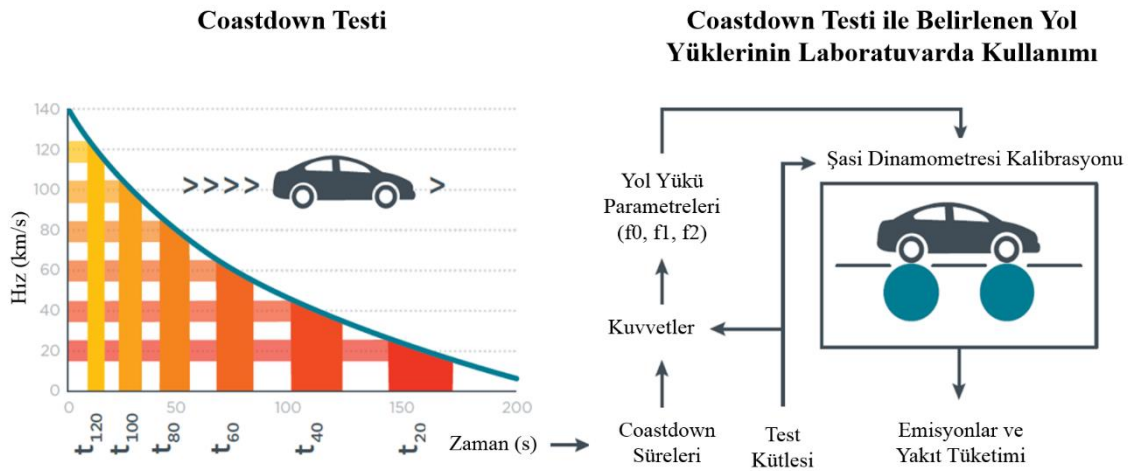
3.7. Yol Yükleri

Taşıtların performans ve dolayısıyla emisyon salınımlarını belirleyen en önemli faktörlerden biri taşıtın yol boyunca maruz kaldığı direnç kuvvetleridir. Direnç kuvvetleri aerodinamik sürtünme, yuvarlanma direnci, ivmelenme ve eğim olarak dört kuvvetten oluşur (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Taşıta etkiyen direnç kuvvetleri

Şasi dinamometrelerinde gerçekleştirilen testlerde ise bu direnç kuvvetleri rulolar aracılığıyla taşıta uygulanır. Yol yükleri olarak adlandırılan direnç kuvvetleri, ayrı bir coast down testi ile taşıt özelinde gerçek dünyadaki sürüş dirençlerine ve kütlesine göre belirlenir (Şekil 3.9). Yol yükleri tespiti için taşıt, düz bir yolda referans hıza kadar hızlandırılır. Daha sonra vites boşa alınır ve taşıt, yuvarlanma direnci ve aerodinamik sürtünmeden dolayı yavaşlayıp durana kadar hızlar ve süreler takip edilir. Kaydedilen hız ve süre verileri ile taşıt kütlesi kullanılarak her bir referans hız için yol yükleri hesaplanır. Yuvarlanma direnci ve aerodinamik sürtünmeyi temsilen, elde edilen yol yükleri (f_0 , f_1 , f_2) dinamometre testlerinde rulolara uygulanır. Eğim şasi dinamometresinde simüle edilmez ancak atalet kuvvetleri ayarlanarak sürece dahil edilebilir (Kühlwein, 2016).



Şekil 3.9. Coastdown testi ve yol yüklerinin belirlenmesi

RDE testlerinde taşıtın maruz kaldığı direnç kuvvetleri anlık olarak ölçülüp laboratuvar şartlarında temsil edilemeyeceğinden, LTÇ testlerinde, referans taşıtın homologasyon testlerinde belirlenen yol yükleri kullanılmıştır. Bu nedenle karşılaştırma testlerinde ortaklaştırılmayan ve sonuçlara etkisi gözlemlenecek olan parametrelerden biri yol yükleridir.

3.8. Ortam Şartları

- Sıcaklık / nem:

WLTP testinin $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ ortam sıcaklığında, 5,5 ila 12,2 g H₂O/kg kuru hava özgül nem ve $\pm\%5$ bağıl nemde gerçekleştirilmesi gerekir. RDE testinde ise ortam sıcaklığı normal ve aşırı olmak üzere iki şekilde sınırlandırılmıştır. Normal ortam sıcaklığının 0 °C ila 30 °C arasında olması gerekir. Ortam sıcaklığı -7 °C ile 0 °C arasına düşerse ya da 30 °C ila 35 °C arasına çıkarsa aşırı sıcaklık seviyelerine geçilmiş olunur ve bu sıcaklık aralıklarındaki emisyonlara belirli düzeltme faktörleri uygulanır. Aşırı sıcaklıklar dışında kalan sıcaklıklarda yapılan RDE testleri geçersiz sayılır. RDE testlerinde nem sınırlandırılmamıştır.

Tez kapsamındaki RDE testlerinin tamamı normal sıcaklık şartlarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar testlerinin yapıldığı test odası iklimik oda özelliklerine sahip olduğundan, LTÇ testleri, karşılaştırıldığı RDE testi boyunca ölçülen sıcaklık ortalaması değerindeki ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir.

- Rakım / ortam basıncı:

WLTP testi, sabit kapalı ortamda gerçekleştirildiği için rakım konusunda sınırlandırılmamıştır. RDE testinde ise rakım, normal ve aşırı olmak üzere iki limit değeri ile ve üç ayrı rakım farkı ile sınırlandırılmıştır. 0 m ila 700 m arası normal rakım, 700 m ila 1300 m arası ise aşırı rakım olarak kabul edilir ve sıcaklıkta olduğu gibi, aşırı rakım değerlerine ulaşılan anlardaki emisyonlara belirli düzeltme faktörleri uygulanır. Ayrıca RDE testinde testin başlayıp bittiği yer arasındaki rakım farkı en fazla 100 m ve test genelinde ve şehir içi fazında 100 km'lik yolda en fazla rakım artışının 1.200 m olması gerekir.

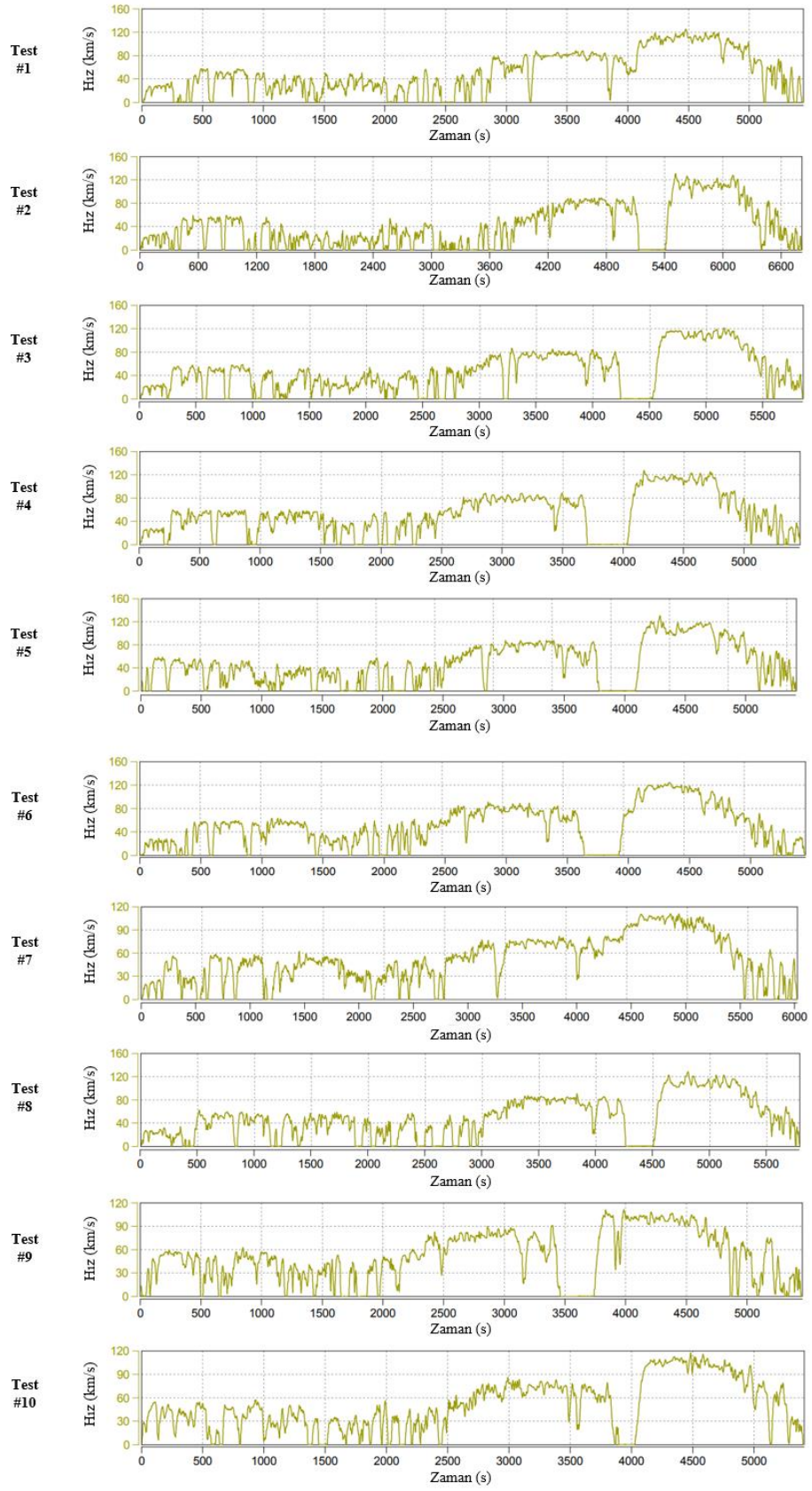
Tez kapsamındaki RDE testlerinin tamamı normal rakım şartlarında gerçekleştirilmiştir ve rakıma bağlı olarak ortam basıncı değişkenlik göstermiştir. LTC testleri ise sabit bir kapalı ortamda, dolayısıyla sabit rakım ve ortam basıncında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle karşılaştırma testlerinde ortaklaştırılmayan ve sonuçlara etkisi gözlemlenecek olan parametrelerden biri rakım ve ortam basıncıdır.

4. BULGULAR

4.1. Test Verileri

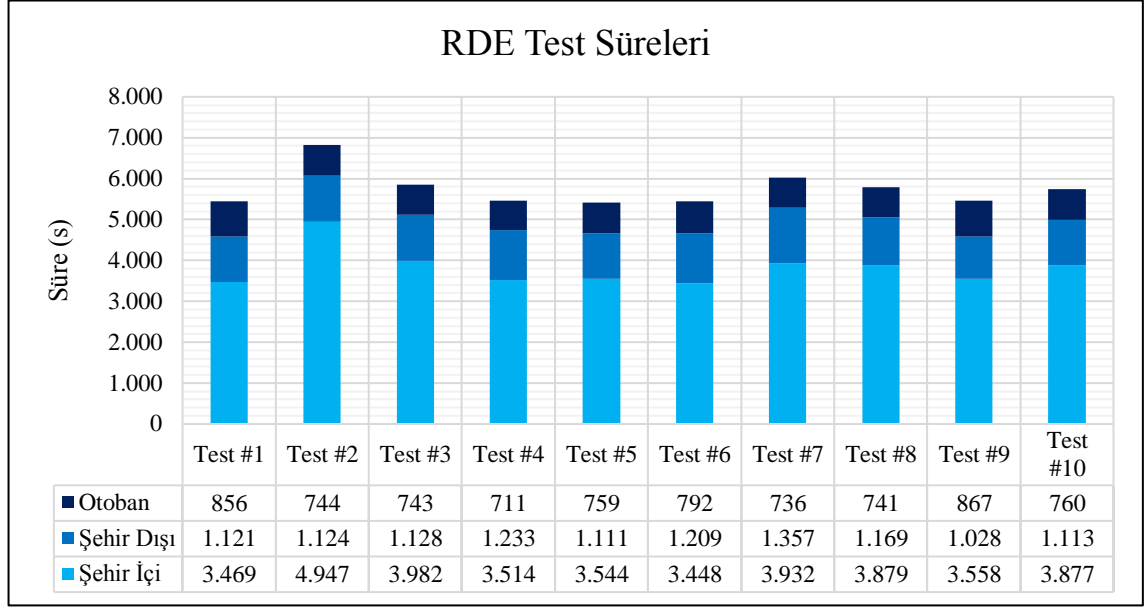
Referans taşıt ile gerçek yol şartlarında, aynı rota üzerinde 10 adet RDE testi gerçekleştirilmiştir. Her bir RDE testi sonrası, test esnasında toplanan hız ve zaman bilgileri kullanılarak, referans taşıtın gittiği yol dinamometre sistemine aktarılmış ve aynı profil LTC testlerinde tekrarlanmıştır. Dinamometrenin, girilen yol profilini taşıta uygulama hassasiyeti regülasyonlar ile kontrol altında tutulan yeterli seviyelerde olduğundan, her bir test çiftindeki yol profillerinin aynı olduğu kabulü yapılabilir (Şekil 4.1). Örneğin; 1. test çifti olan RDE1 testi ile LTC1 testinin; test mesafesi, test süresi, ortalama hız, ivmelenme gibi hız ve zamana bağlı parametreleri aynı olacağından testler aynı çevrimde gerçekleştirilmiş denebilir.

Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3'te görüleceği üzere; karşılaştırmalı testler RDE testlerini baz aldığından ve RDE testleri aynı rotada gerçekleştiğinden test mesafeleri 74 ila 70 km arasında değişmiştir. Fakat testler farklı gün ve saatlerde gerçekleştiği için, trafiğe bağlı olarak test süreleri 90 ila 114 dak arasında değişmiştir. Yine de RDE testi, Çizelge 3.2'de belirtilen sınır koşullarına uyması gerektiğinden, testler belirli bir ortalama hız aralığında tamamlanmıştır. Şehir içi fazın ortalama hız ortalaması 27,94 km/s ve standart sapması 2,86 km/s, şehir dışı fazın ortalama hız ortalaması 76,11 km/s ve standart sapması 1,14 km/s, otoban fazının ise ortalama hız ortalaması 109,04 km/s ve standart sapması 3,34 km/s olarak gerçekleşmiştir.

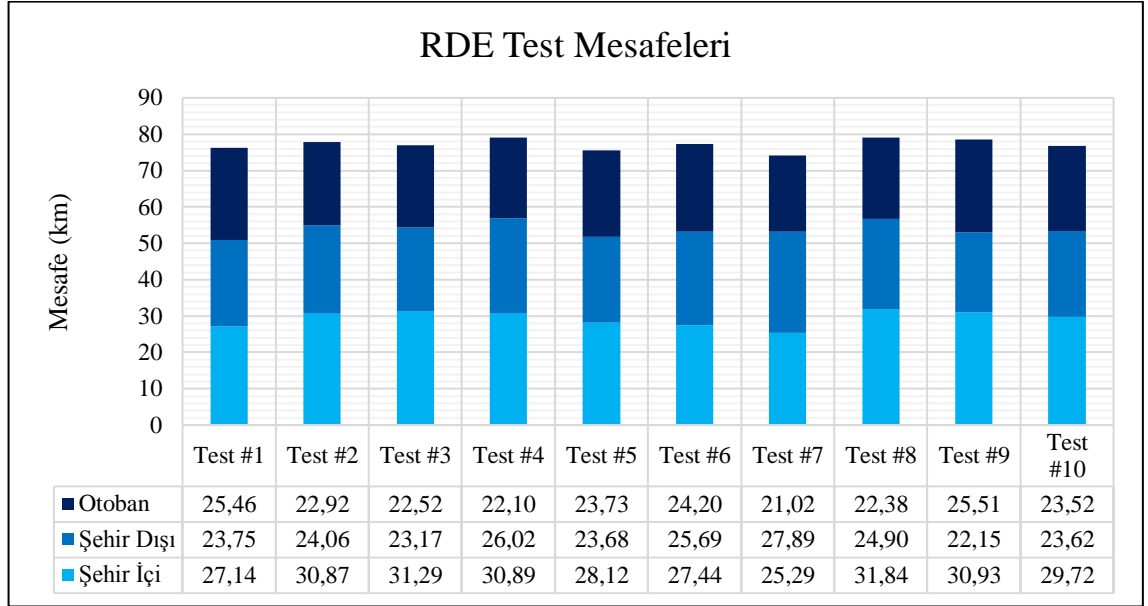


Şekil 4.1. RDE ve LTÇ testlerinin hız – zaman profilleri

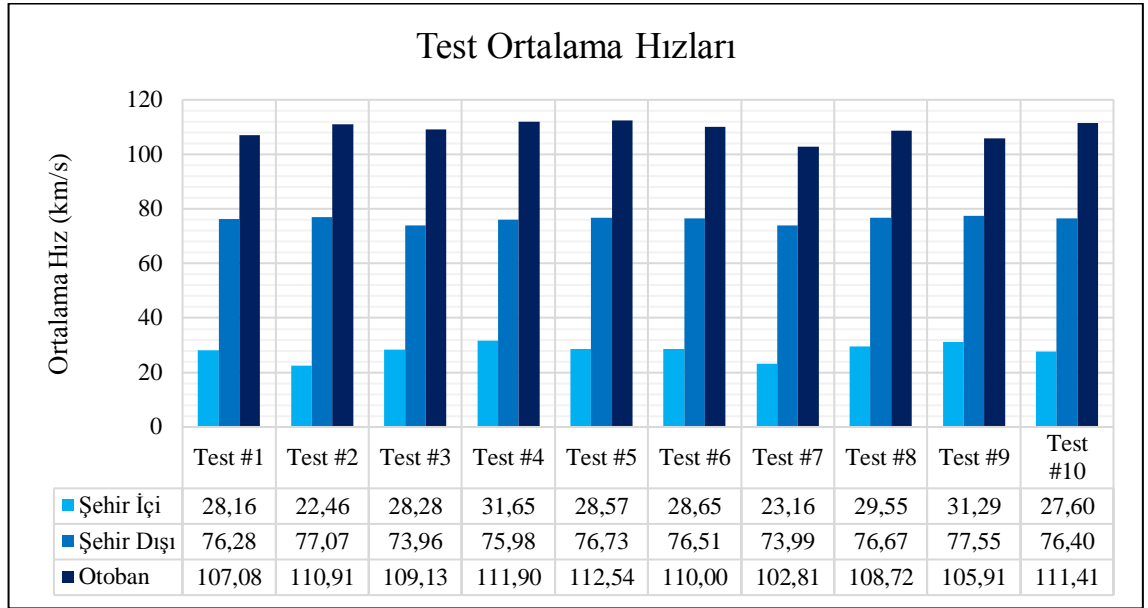
Çizelge 4.1. RDE ve LTÇ test süreleri



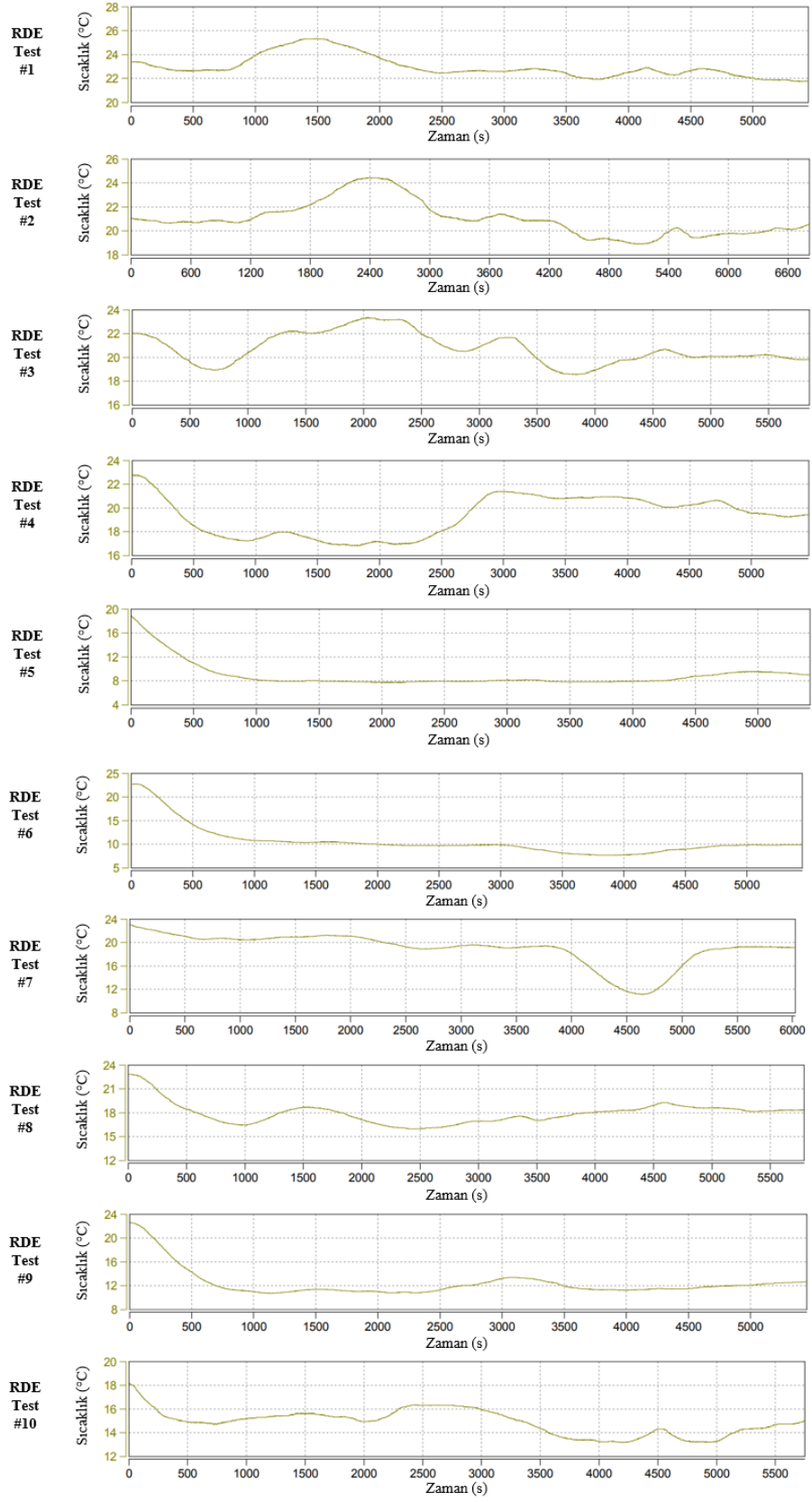
Çizelge 4.2. RDE ve LTÇ test mesafeleri



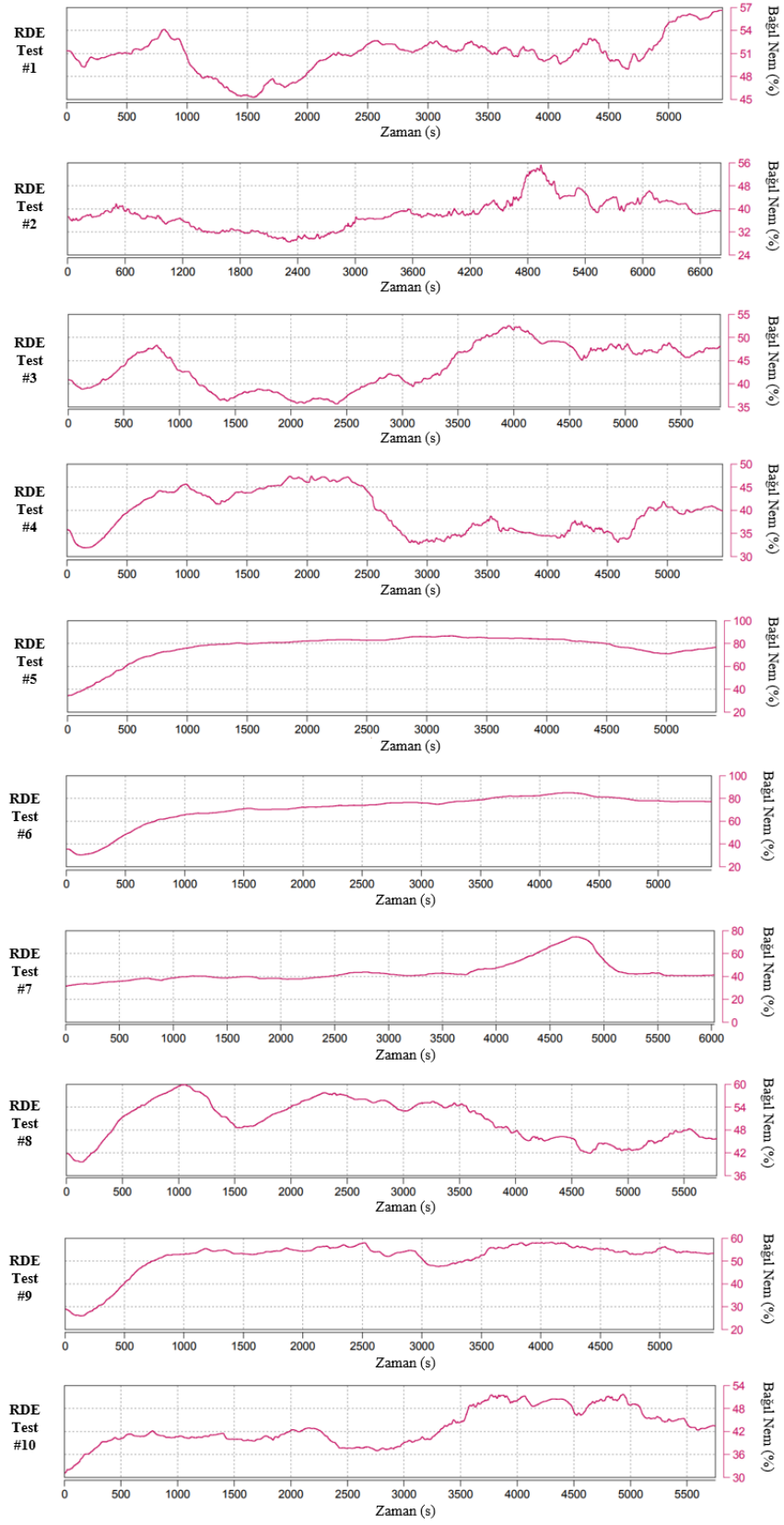
Çizelge 4.3. RDE ve LTÇ test mesafeleri



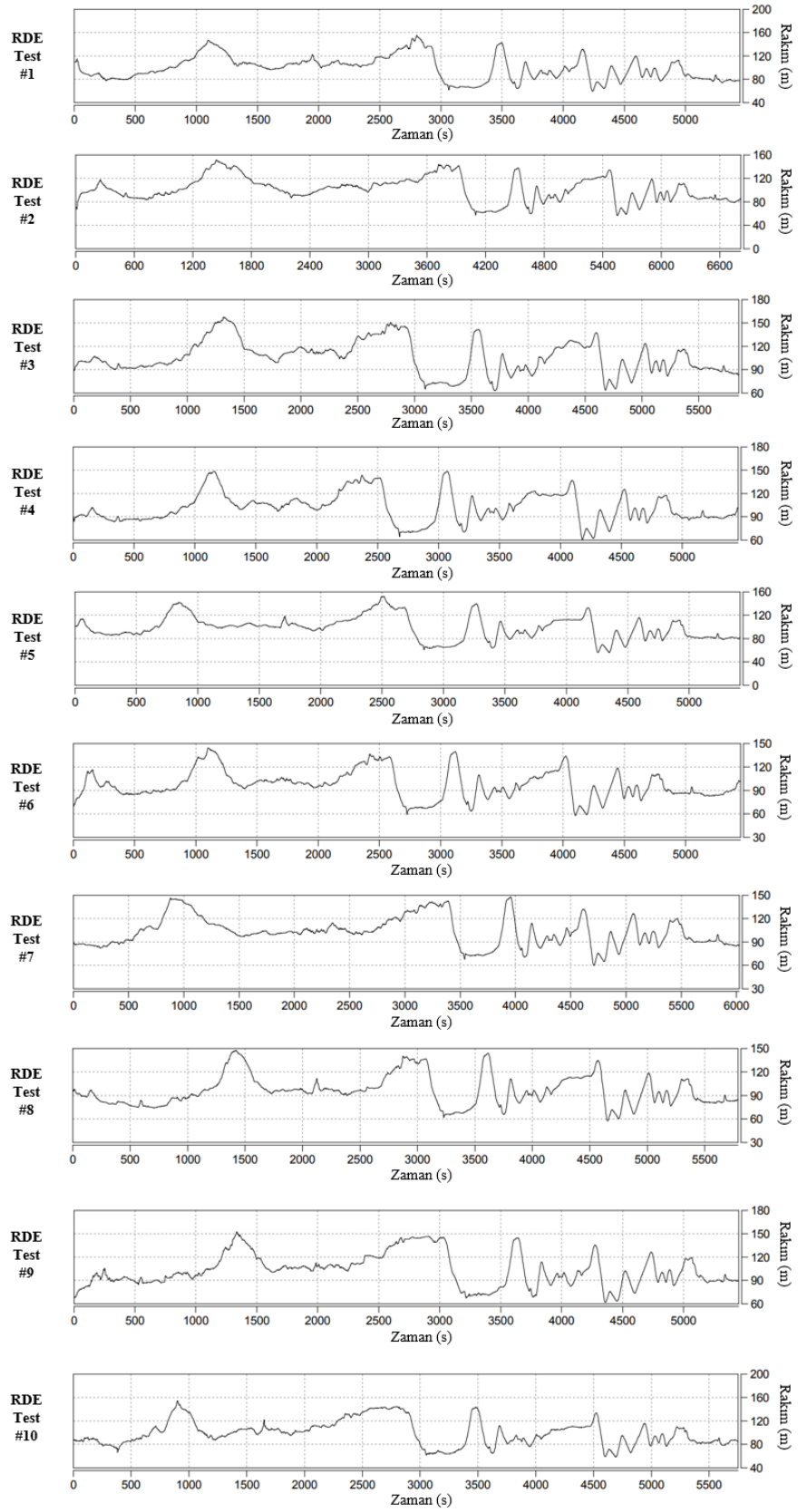
Her bir RDE testi, aynı rotada yapılsa da ölçüm sonucu çeşitliliği yakalamak adına farklı zamanlarda, dolayısıyla farklı ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Hava istasyonundan alınan veriler (Şekil 4.2) ile her bir RDE testindeki sıcaklık ortalaması hesaplanıp, LTÇ testlerinin yapıldığı klimatik oda bu değere ayarlanmış ve iki test arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanabilecek farklılıklar minimize edilmiştir. RDE testlerindeki özgül ve bağıl nem (Şekil 4.3) ortam şartlarında göre değişkenlik gösterirken, LTÇ testleri 6 ila 12 g H₂O/kg kuru hava özgül nemde ve \pm %5 bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. RDE testlerinde rakım (Şekil 4.4) ve dolayısıyla ortam basıncı (Şekil 4.5) değişkenlik göstermiş, LTÇ testleri ise sabit laboratuvar ortamında gerçekleştiğinden sabit rakımda ve yaklaşık ortalama 1 atm ortam basıncında gerçekleştirilmiştir.



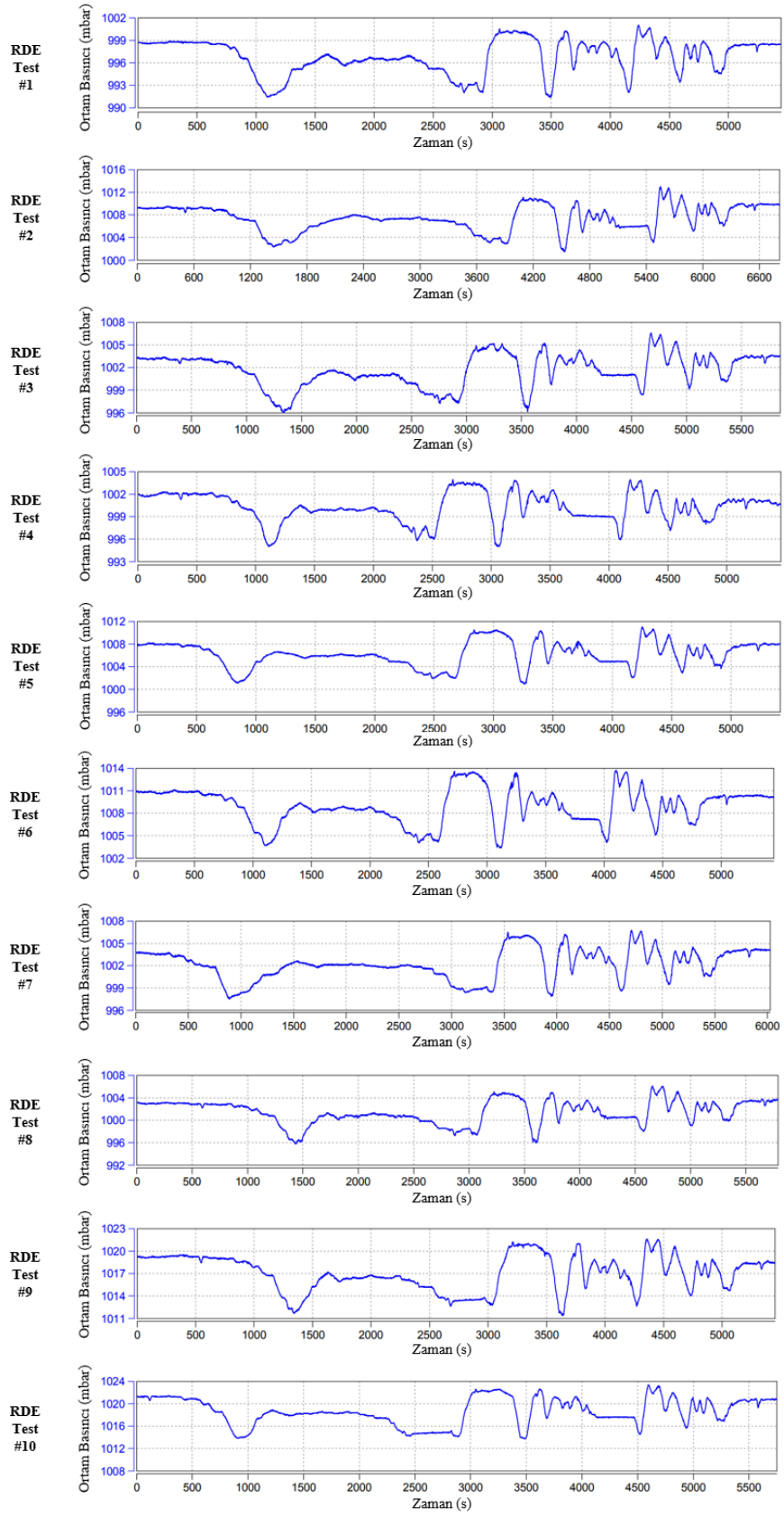
Şekil 4.2. RDE testleri ortam sıcaklıkları



Şekil 4.3. RDE testleri bağlı nem



Şekil 4.4. RDE testleri rakım



Şekil 4.5. RDE testleri ortam basıncı

4.2. Test Sonuçları

Testlerde, MPI benzinli motora sahip bir taşıtın tabi olduğu RDE standartları gereği; NO_x, CO ve CO₂ gazlarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler hem RDE hem LTÇ testlerinde aynı PEMS cihazı ile gerçekleştirilmiş ve her test öncesi ve sonrası cihazın gerekli ölçüm kontrolleri yapıp, sonuçların doğruluğu garanti altına alınmıştır. Test sonuçlarında herhangi bir limit dışı durum veya anormallik ile karşılaşmamıştır. Test sonuçlarında ortaya çıkan emisyon değerleri Çizelge 4.4'te katsayısal olarak verilmiştir. Her iki test türünde ve her ayrı emisyon gazı için farklı katsayılar kullanılmıştır. Her bir kategorideki en düşük emisyon sonucu referans olarak seçilmiş ve diğer sonuçlar bu referans değerinin katsayıları olarak verilmiştir. Örneğin; 10 adet RDE testi içerisindeki en düşük NO_x emisyonu sonucuna sahip olan test, 8 numaralı testtir. Bu sonuca A1 değeri tanımlanmıştır. Diğer RDE testi NO_x değerleri bu en düşük A1 değerinin katsayıları olarak belirlenmiştir. Örneğin; 1. RDE testinin NO_x sonucu en düşük A1 sonucunun 1,03 katı ölçülmüştür. LTÇ testleri NO_x emisyonu sonuçlarına A1 yerine A2 katsayısının verilmesinin nedeni, testlerin kendi içindeki varyasyonu göstermek amaçlıdır. Bu yaklaşım ile her bir testin farklı emisyon gazı sonuçları kendi içerisinde değerlendirilebilir.

Çizelge 4.4. RDE ve LTÇ testleri emisyon sonuçları

TEST	NO _x	CO	CO ₂
RDE #1	1,03 A1	1,48 B1	1,15 C1
RDE #2	1,92 A1	1,48 B1	1,19 C1
RDE #3	1,38 A1	1,27 B1	1,24 C1
RDE #4	1,04 A1	B1	1,06 C1
RDE #5	1,06 A1	1,02 B1	1,04 C1
RDE #6	1,47 A1	1,23 B1	1,03 C1
RDE #7	1,06 A1	1,14 B1	1,04 C1
RDE #8	A1	1,32 B1	1,12 C1
RDE #9	1,10 A1	1,24 B1	1,04 C1
RDE #10	1,19 A1	1,03 B1	C1

TEST	NO _x	CO	CO ₂
LTÇ #1	1,22 A2	1,40 B2	1,23 C2
LTÇ #2	1,61 A2	1,70 B2	1,20 C2
LTÇ #3	1,52 A2	1,52 B2	1,23 C2
LTÇ #4	1,01 A2	1,22 B2	1,13 C2
LTÇ #5	1,51 A2	1,34 B2	1,14 C2
LTÇ #6	1,10 A2	1,26 B2	1,06 C2
LTÇ #7	1,36 A2	1,21 B2	1,07 C2
LTÇ #8	A2	1,16 B2	1,15 C2
LTÇ #9	1,52 A2	1,17 B2	1,06 C2
LTÇ #10	1,18 A2	B2	C2

4.3. Emisyon Faktörleri

Her bir testin emisyon sonuçları elde edildikten sonra, testler arasındaki ilişkilerin saptanması için sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her bir emisyon gazı için; RDE testi sonucunun, LTÇ testi sonucuna oranına göre faktörler belirlenmiştir. Örneğin, 1. testin NO_x faktörü için:

$$\text{NO}_x \text{ Faktör}_1 = \frac{\text{NO}_x \text{ RDE \#1}}{\text{NO}_x \text{ LTÇ \#1}} = \frac{1,03 \text{ A1}}{1,22 \text{ A2}} = 1,10 \quad (4.1)$$

yaklaşımı kullanılarak, 1. test için RDE testinde ölçülen NO_x gazının, LTÇ testindeki NO_x gazına oranı 1,10 olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşımla hesaplanan emisyon faktörleri Çizelge 4.5'teki gibidir. Emisyon faktörlerinde ±%25 sapma dışında hesaplananlar kırmızı ile gösterilmiştir.

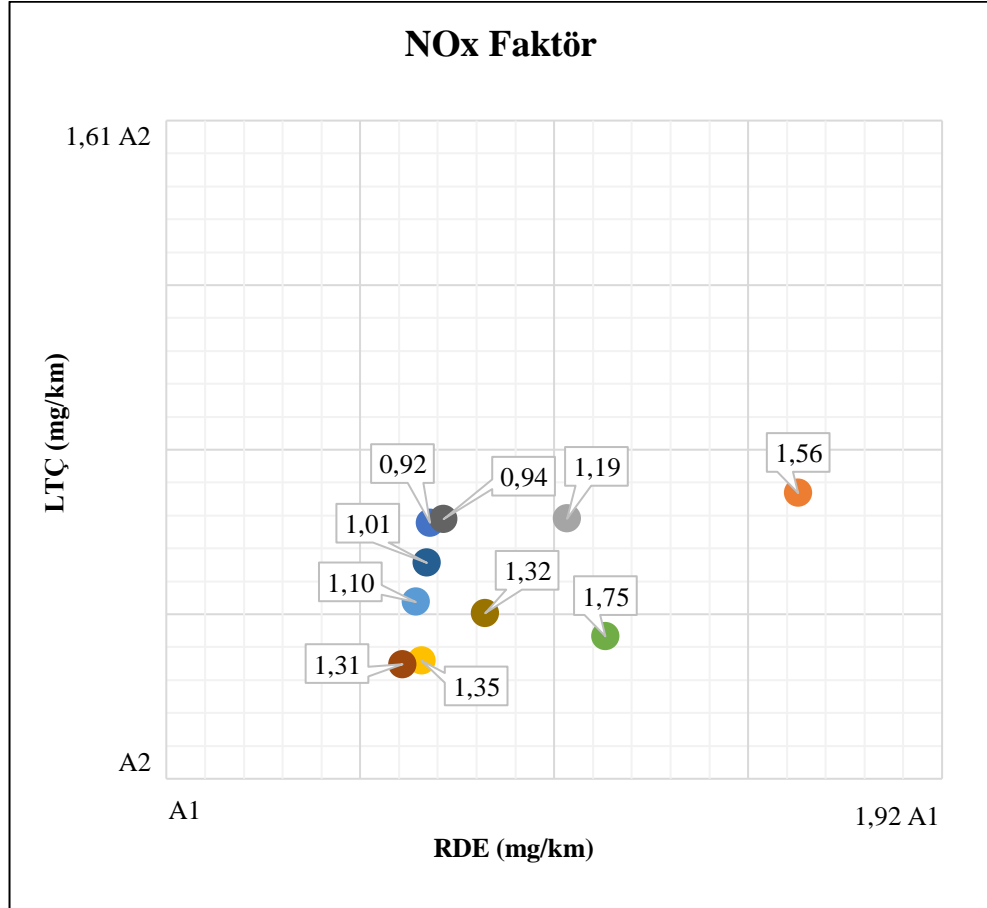
Çizelge 4.5. NO_x, CO ve CO₂ faktörleri

Test	NO _x Faktör	CO Faktör	CO ₂ Faktör
#1	1,10	1,13	1,06
#2	1,56	0,92	1,13
#3	1,19	0,89	1,15
#4	1,35	0,87	1,06
#5	0,92	0,81	1,04
#6	1,75	1,04	1,10
#7	1,01	1,00	1,11
#8	1,31	1,21	1,11
#9	0,94	1,12	1,12
#10	1,32	1,09	1,14

4.3.1. NO_x faktörü

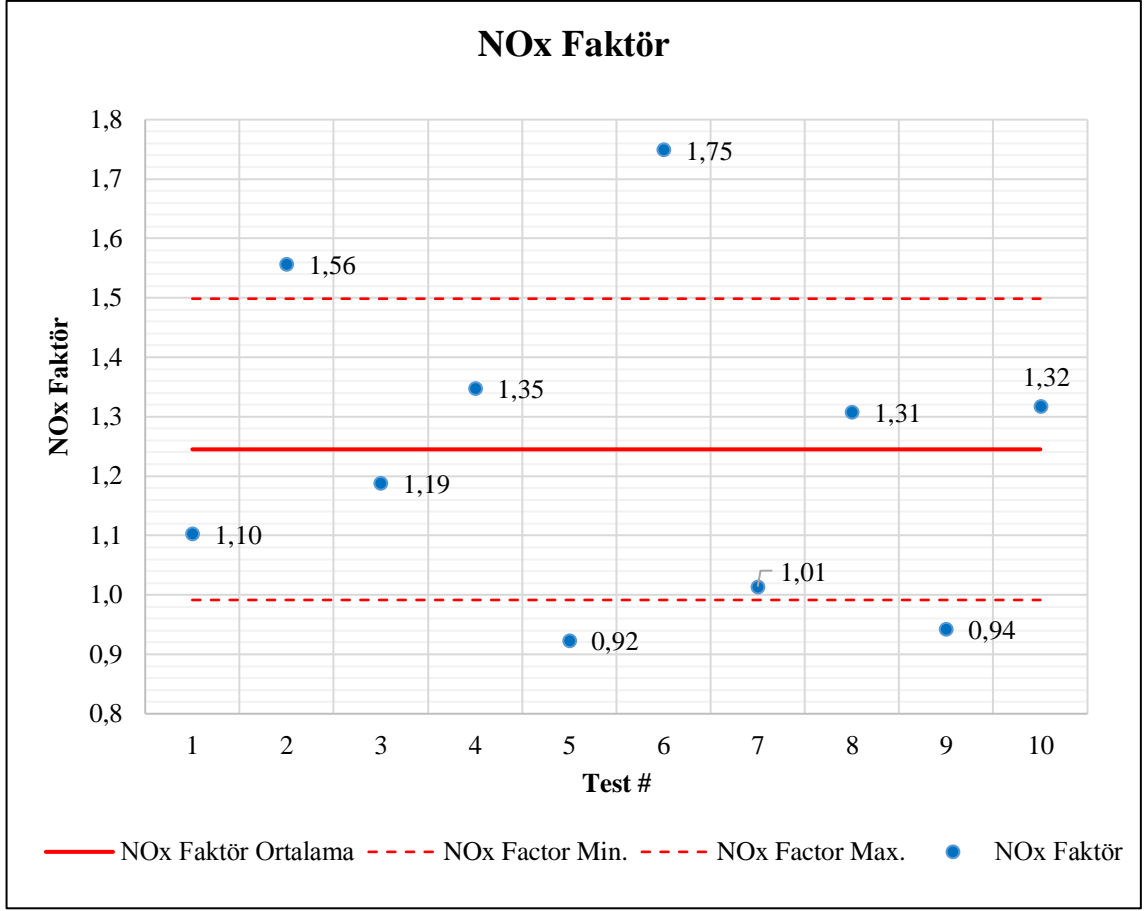
NO_x gazı içeriği NO ve NO₂ gazlarından oluşur. Ölçümlerin yapıldığı Gas PEMS cihazındaki NDUV analizörüne gelen egzoz gazındaki NO ve NO₂ gazları ayrı ayrı, “ppm” cinsinden ölçülür ve ilgili emisyon standartlarında belirtilen formüller kullanılarak test sonunda tek bir NO_x gazı sonucu olarak, “mg/km” cinsinden raporlanır. NO_x gazı, ölçüm yapılan diğer gazlara göre daha düşük derişime sahip olduğundan dolayı sayısal olarak düşük seviyelerde sonuçlar verir. Yapılan toplam 10 ayrı karşılaştırmalı testte NO_x

gazı en az 71P ppm, en fazla 163P ppm olarak ölçülmüştür. RDE testlerinde A1 ile 1,92 A1 mg/km arasında, LTÇ testlerinde ise A2 ile 1,61 A2 mg/km arasında sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. RDE ve LTÇ testleri NOx faktörleri

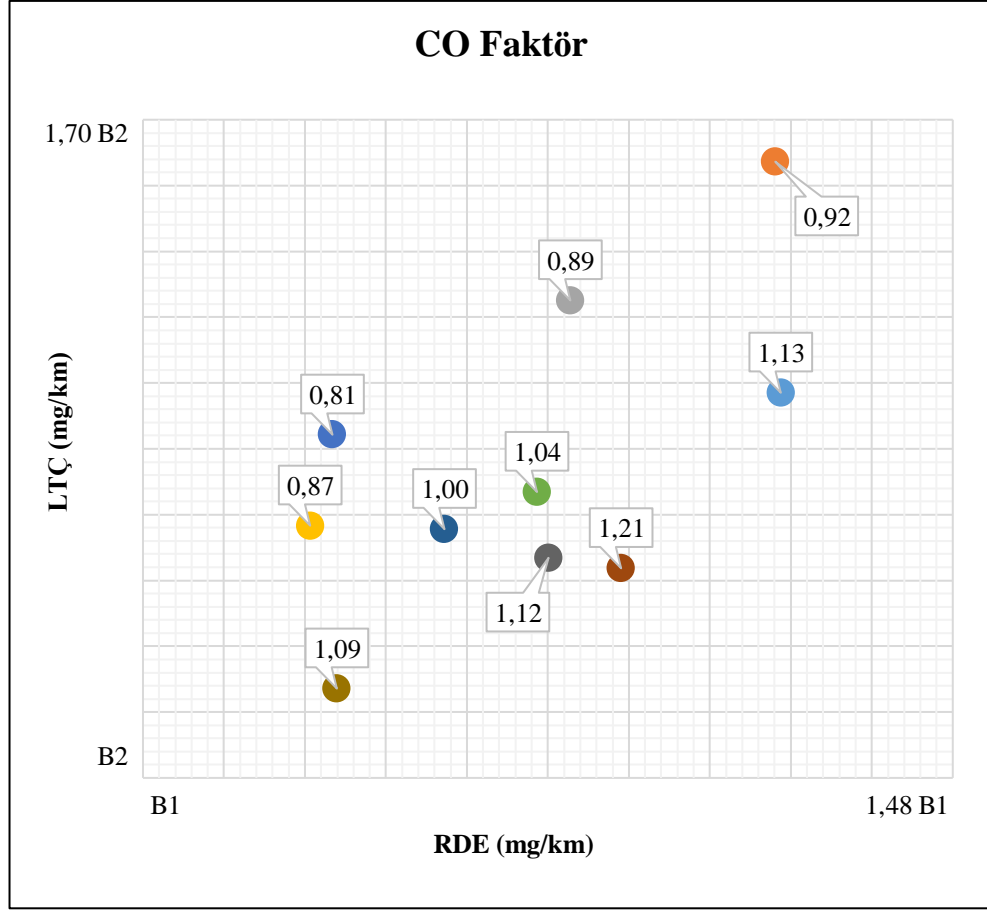
Her bir karşılaştırmalı test kendi içerisinde değerlendirildiğinde NOx faktörleri 0,92 ile 1,75 arasındadır. 0,92 ve 0,94 NOx faktör sonucunu veren 2 karşılaştırmalı test dışında kalan testlerde yolda ölçülen NOx değerleri, laboratuvarında ölçülenlere göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. 1,25 olan 10 karşılaştırmalı testin NOx faktörler ortalaması, yolda yapılan testlerin genel anlamda laboratuvarında yapılanlara göre daha yüksek sonuçlar verdiğini gösterir. Sonuçların standart sapması ise 0,254'tür. (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. NO_x faktör analizi

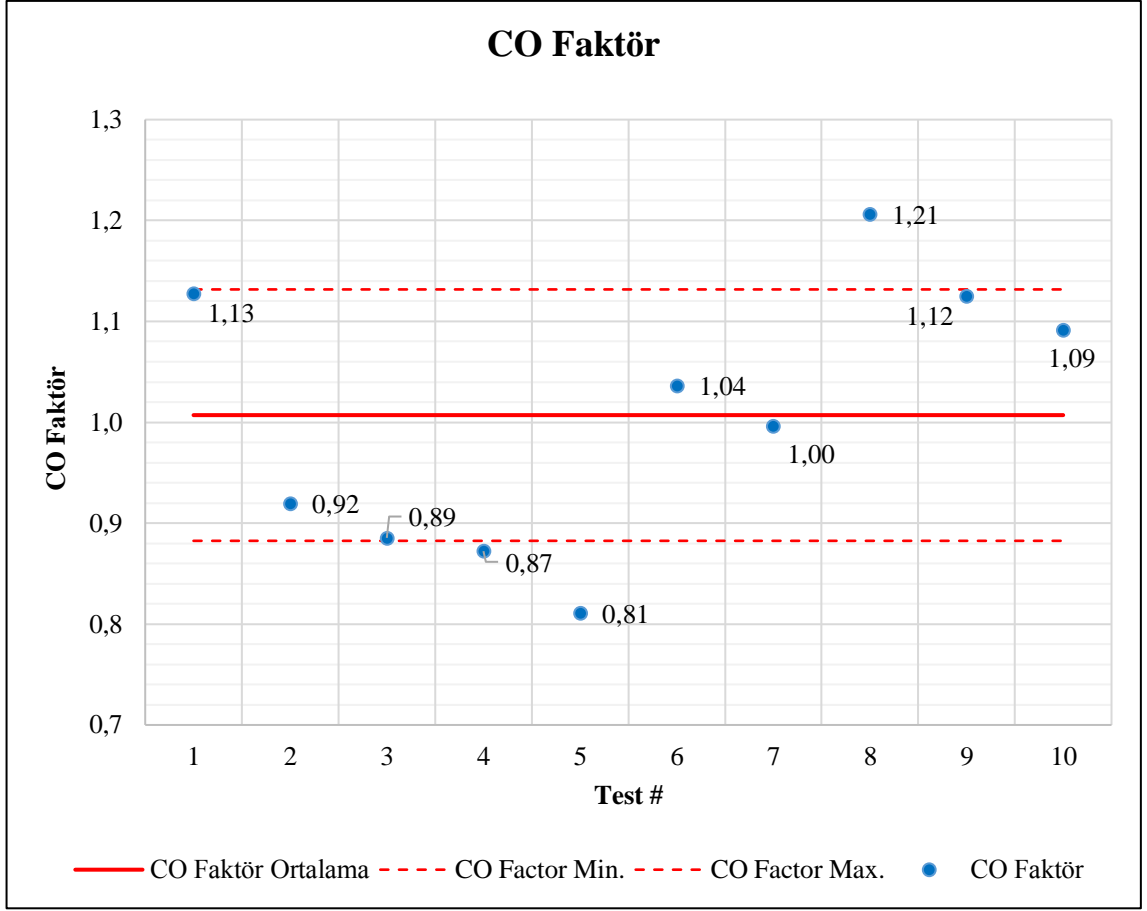
4.3.2. CO faktörü

CO gazı, Gas PEMS cihazındaki NDIR analizöründe “ppm” cinsinden ölçülür ve “mg/km” cinsinden raporlanır. CO, benzinli bir motorda en yüksek derişimli emisyon gazlarından birisidir. Yapılan toplam 10 ayrı karşılaştırmalı testte CO gazı en az 15.872P ppm, en çok 46.238P ppm olarak ölçülmüştür. RDE testlerinde B1 ila 1,48 B1 mg/km arasında, LTCÇ testlerinde ise B2 ila 1,70 B2 mg/km arasında sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.8. RDE ve LTÇ testleri CO faktörleri

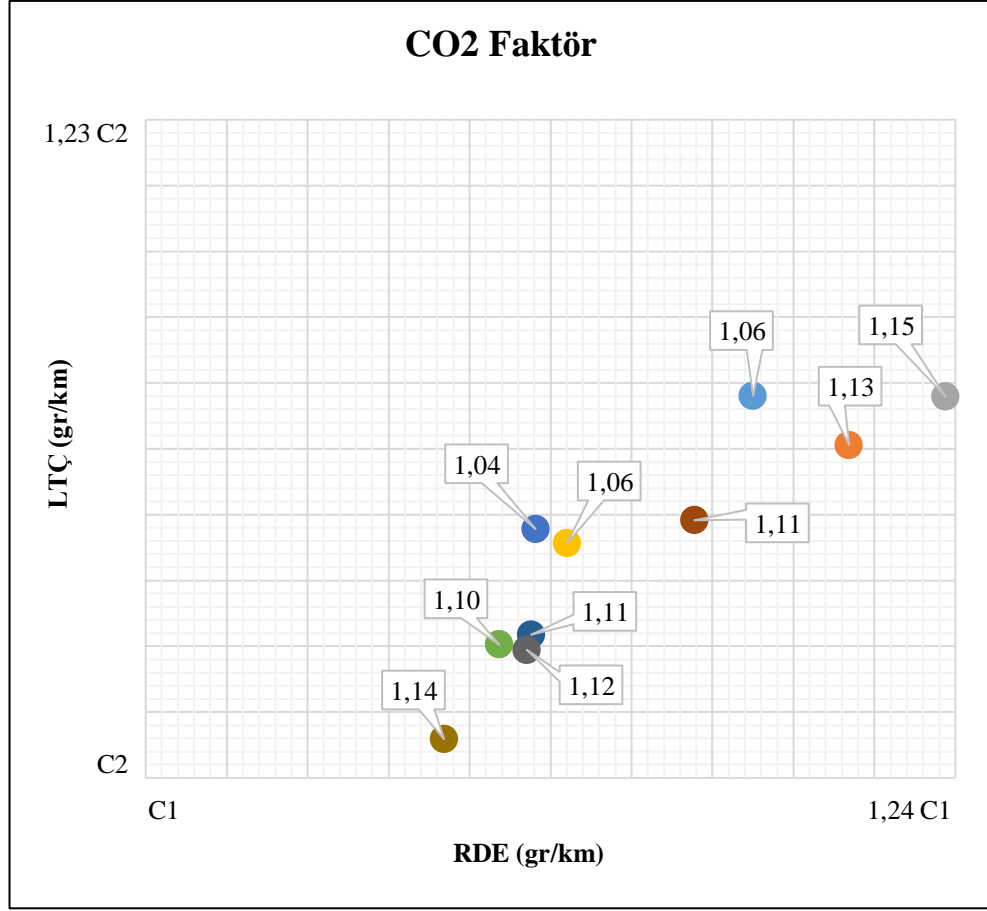
Her bir karşılaştırmalı test kendi içerisinde değerlendirildiğinde CO faktörleri 0,81 ila 1,21 arasındadır. CO faktörünün 1 olduğu bir karşılaştırmalı testte aynı sonuçlar gözlenirken, 4 karşılaştırmalı testte laboratuvar, 5 karşılaştırmalı testte yol testi sonuçları yüksek çıkmıştır. Aynı zamanda 1,01 olarak hesaplanan CO faktörleri ortalaması; sonuçların NO_x gibi genel anlamda yolda yüksek çıkmadığını, belirli bir aralıkta değişkenlik gösterdiği sonucunu verir. Faktörlerin standart sapması ise 0,125'tir. Bu sonuç CO ölçümünün NO_x ölçümüne göre daha tutarlı sonuçlar verdiğini gösterir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. CO faktör analizi

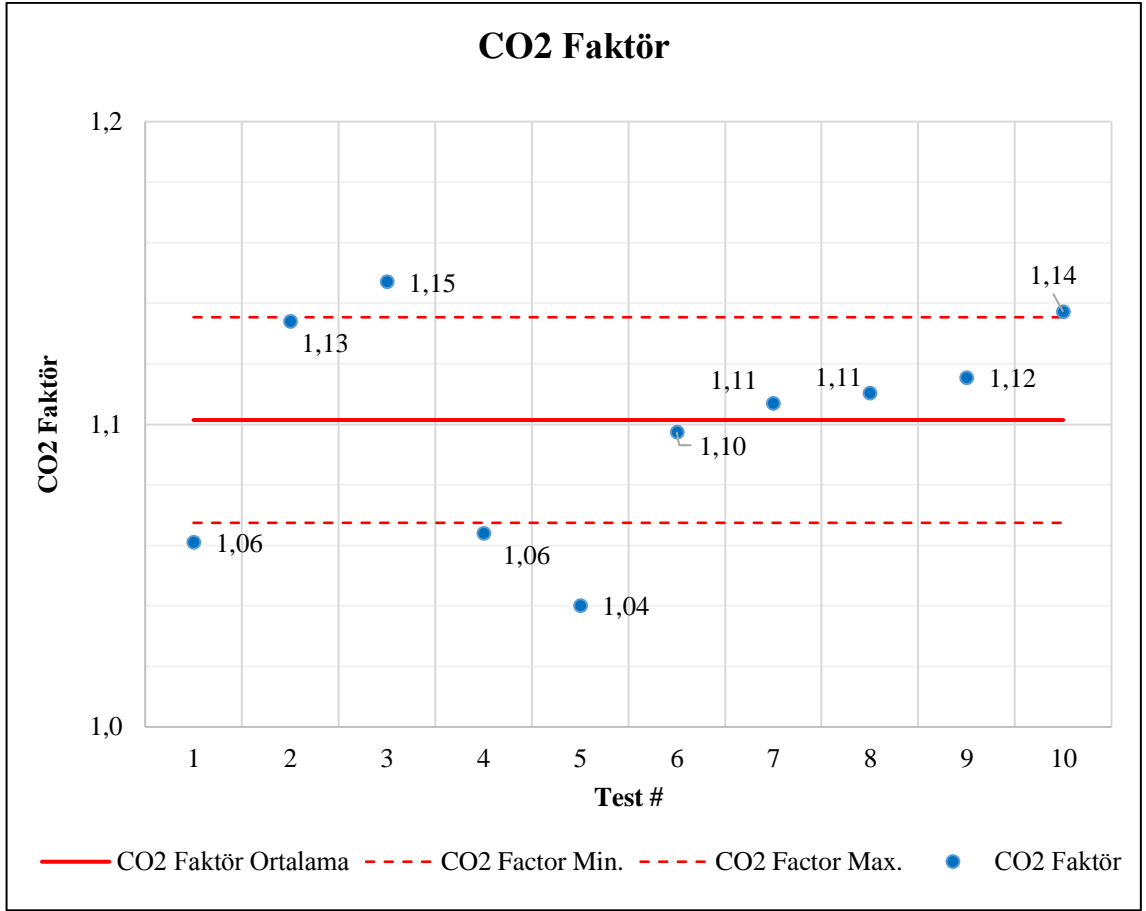
4.3.3. CO2 faktörü

CO2 gazı, CO gazı gibi Gas PEMS cihazındaki NDIR analizöründe, fakat diğer gazlardan farklı olarak yüzdesel (%) olarak ölçülür ve “g/km” cinsinden raporlanır. CO2, yanma tepkimesinin doğal bir ürünü olduğundan diğer kirletici emisyonlara göre çok daha yüksek hacimlerde salınır (Şekil 2.2). Yapılan toplam 10 ayrı karşılaştırmalı testte CO2 gazı en az 1155Y %, en çok 1253Y % olarak ölçülmüştür. CO2 sonuçları RDE testlerinde C1 ila 1,24 C1 g/km arasında, LTC testlerinde ise C2 ila 1,23 C2 g/km arasında ölçülmüştür (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. RDE ve LTÇ testleri CO2 faktörleri

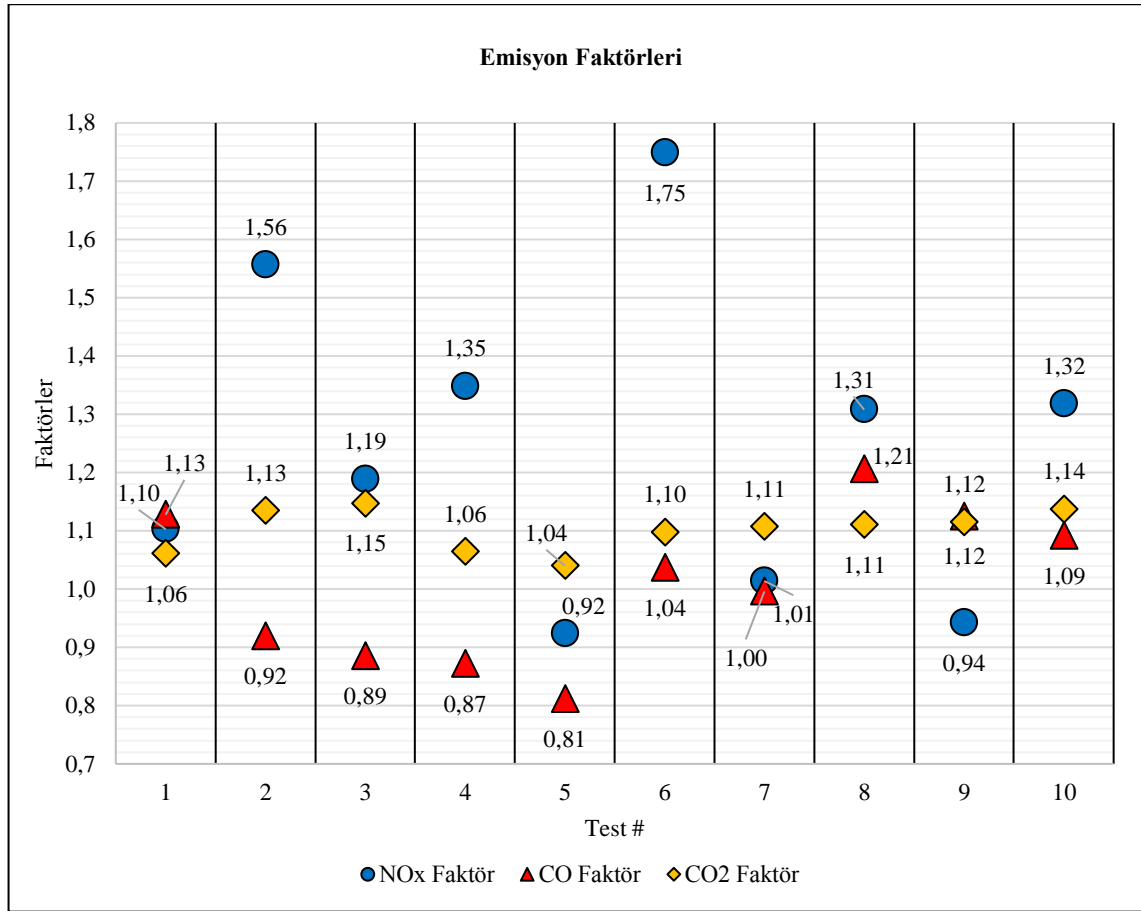
Her bir karşılaştırmalı test kendi içerisinde değerlendirildiğinde CO2 faktörleri 1,04 ila 1,15 arasındadır. Her karşılaştırmalı testte yolda ölçülen CO2 değeri, laboratuvarında ölçülene göre yüksek çıkmıştır ve CO2 faktörlerinin ortalaması 1,1 olarak hesaplanmıştır. Standart sapmanın 0,034 olarak hesaplanması, CO2 gazının en tutarlı ölçülen gaz olduğu sonucunu verir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. CO2 faktör analizi

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Taşıt emisyonlarını gerçek sürüş şartlarında ölçmeye imkân veren RDE testinin, laboratuvar ortamında mümkün olduğu kadar temsil edilip 10 ayrı karşılaştırmalı testte incelenen deney sonuçları 4. Bölüm’de detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, emisyon faktörlerine bir arada bakıldığında; farklı testler için ve farklı emisyon gazları için ayrı ayrı yorumlar yapılabilir.



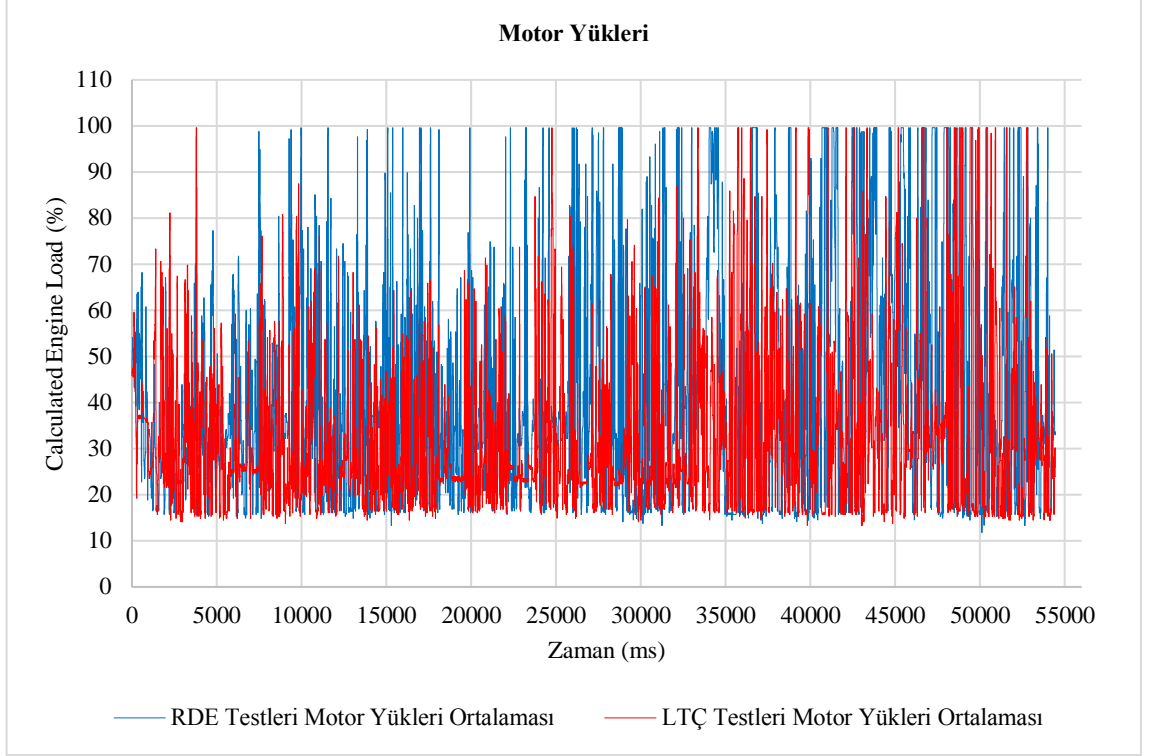
Şekil 5.1. Emisyon faktörleri

Testler birbirleri ile karşılaştırıldığında; test #1, #5, #7, #8, #9 ve #10’un genel anlamda tutarlı sonuçlar verdiği, fakat test #2, #3, #4 ve #6’nın farklı emisyon gazları için daha geniş bir aralıkta emisyon faktörleri ortaya çıktığı görülür. Bu noktada genel bir kabul yapıp, RDE testinin laboratuvarda temsil edildiği koşulda bütün emisyon gazları için ortak bir katsayı ortaya konabilmesi olası gözükmemektedir. Diğer bir yandan bütün emisyon faktörlerinin %80’nin 1 ve üzerinde hesaplanması; gerçek yol koşullarının, her

ne kadar mümkün olabildiğinde temsil edilmeye çalışılsa da, laboratuvar koşullarına göre daha yüksek emisyon sonuçlarına neden olduğu sonucunu ortaya koyar. Bu durumun sebebi karşılaştırmalı testler arasında ortaklaştırılmayan parametrelerden kaynaklanır. Özellikle yol yüklerinin gerçek yol şartlarında değişken olup, laboratuvar da dinamometre üzerinde sabit olarak taşıta uygulanması bu farkın başlıca nedeni olarak görülebilir. Bu noktada testlerde taşıta uygulanan yol yüklerinin motor çalışma sıcaklığına etkisi incelenmiştir. Yol yükü değerleri direkt olarak incelenemeyeceğinden, taşıta uygulanan toplam direnç kuvvetini yenmek için uygulanan motor yükü değeri incelenmiştir. Bunun için taşıttan anlık olarak alınan ve hesaplanan motor yükü anlamına gelen “Calculated Engine Load” parametresi okunmuştur. Bu parametre motor yükünü yüzdesel olarak ifade eder ve %100 olduğu durum gaz keleşinin tam açık olduğu anı temsil eder. Yaklaşık 100 dakikalık çevrimleri grafik üzerinden okumak anlamlı sonuç vermeyeceğinden ve emisyon sonuçları tüm çevrimin toplamını kapsayacak şekilde ortalama olarak ifade edildiğinden motor yükleri de her bir çevrim için ortalama olarak incelenmiştir. Çizelge 5.1’de her bir testin ortalama motor yükü değerleri ve karşılaştırmalı testlerin farkları verilmiştir. Şekil 5.2’de ise bütün RDE ve LTÇ testlerinin ortalamaları alınarak motor yükü değerleri tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. RDE ve LTÇ testlerinin ortalama motor yükü değerleri

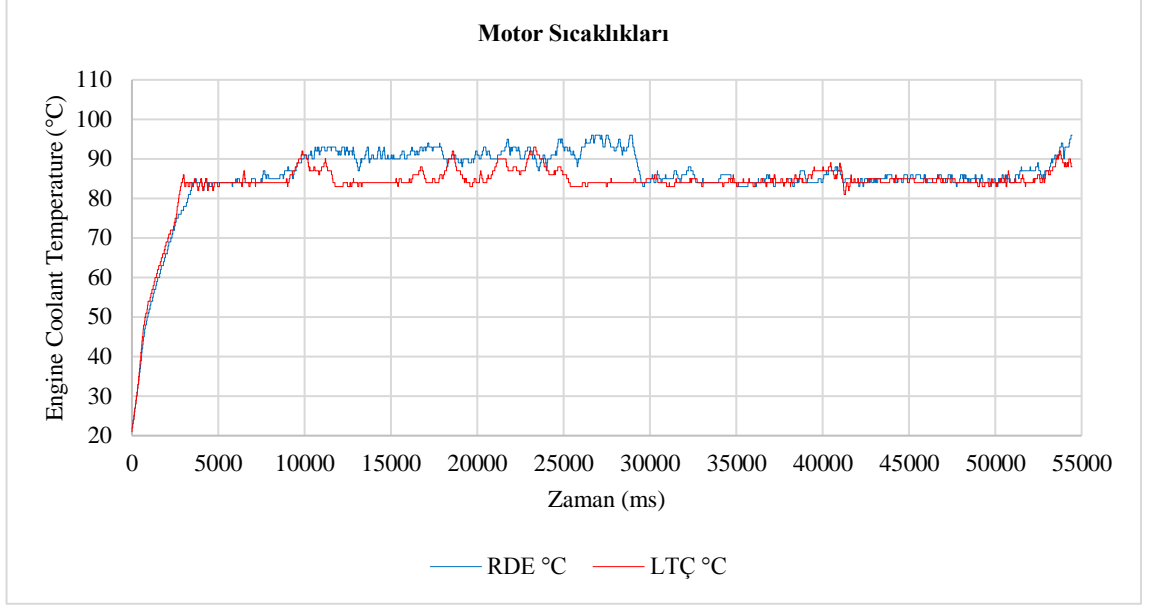
	RDE (%)	LTÇ (%)	Fark (%)
Test #1	43,04	40,54	2,50
Test #2	40,11	33,72	6,39
Test #3	40,03	32,78	7,25
Test #4	42,38	39,52	2,86
Test #5	41,76	39,75	2,01
Test #6	40,24	36,46	3,78
Test #7	40,19	36,15	4,04
Test #8	41,44	35,58	5,86
Test #9	40,98	34,85	6,13
Test #10	41,61	34,77	6,84
Ortalama	41,18	36,41	4,77



Şekil 5.2. RDE ve LTÇ testlerinin ortalama motor yükü değerlerinin ortalamalarının grafik gösterimi

Testlerdeki motor yükü değerlerinin yüzdesel olarak farklarına bakıldığında sıralamanın CO₂ faktörleri ile aynı olması dikkat çekicidir. En düşük motor yükü farkına (%2,01) sahip olan karşılaştırmalı test #5'te, en düşük CO₂ faktörü (1,04) hesaplanmıştır; en yüksek motor yükü farkına (%6,84) sahip olan karşılaştırmalı test #10'da ise, en düşük CO₂ faktörü (1,14) hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre motor yükünün CO₂ emisyonları ile direkt korelasyonu olduğu söylenebilir.

Bir diğer dikkat çekici parametre ise motor sıcaklıklarıdır. Motor yüklerine bağlı olarak daha çok yüzdesel yüke maruz kalan RDE testlerinde daha yüksek motor sıcaklıklarına ulaşıldığı tahmini yapılmıştır ve bütün RDE ve LTÇ testlerinin motor sıcaklık ortalamaları alınarak Şekil 5.3'te gösterilmiştir. RDE testlerinde, özellikle ilk 30000 ms'de gerçekleşen şehir içi fazında motor sıcaklık ortalamalarının LTÇ testlerine göre daha yüksek olduğu görülebilir. Yanma sıcaklığı ile doğrudan ilişkili olan NO_x emisyonlarının RDE testlerinde ortalama 1,25 kat fazla çıkması motor sıcaklıkları ile, dolayısıyla yol yükleri ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 5.3. RDE ve LTÇ testlerinin ortalama motor sıcaklıkları

Emisyon gazları tek tek incelendiğinde ise gazların derişimlerinin sonuçlar üzerindeki etkisi göze çarpar. NO_x gibi düşük derişimli gazlar, RDE ve LTÇ testlerinin kendi içinde dahi daha geniş bir hassasiyette sonuç verdiğiinden dolayı bu gazların laboratuvar katsayılarının belirlenmesinde diğer gazlara göre daha yüksek toleranslı çalışılması gerekliliğini ortaya koyar. CO gazında ise sonuçlar NO_x'e göre daha tutarlıdır fakat NO_x'te yoldaki sonuçlar laboratuvara göre genelde yüksek çıkarken CO'te ise durum yarı yarıyadır. En tutarlı ölçüm sonuçları CO₂ gazından gözlemlenmiştir. CO₂ faktörlerinin 0,034 gibi düşük bir standart sapma ve 1,10 ortalama sonucunun çıkmasıyla, yol koşullarında salınan CO₂ miktarının laboratuvarda salınana göre 1,1 kat yüksek çıktığı genellemesi rahatlıkla yapılabilir.

Çalışma sonucu göstermiştir ki, gerçek sürüş emisyonlarının laboratuvar şartlarında ölçülmesi farklı emisyon gazları için farklı hassasiyetlerde mümkün olabilmektedir. Farklı motorizasyonlar ve farklı emisyon gazları için ayrı ayrı yapılabilecek çalışmalar neticesinde, taşıtların gerçek sürüş emisyonları laboratuvarda temsil edilebilir ve yaklaşık sonuçlar elde edilebilir. Tez sonucunda gözlemlenen yol ve laboratuvar şartlarında farklılaşan yol yükleri ve yol yüklerinin emisyonlara etkisinden yola çıkarak, laboratuvarda temsil edilmek istenen testler yol yükleri arttırarak yol testlerine yakınsanabilir. Yanı sıra, bu çalışmadaki NO_x gazı sonuçlarında olduğu gibi daha geniş

bir hassasiyette ve yolda daha yüksek sonuçlar veren farklı emisyon gazları için RDE rotalarına göre daha agresif çevrimler laboratuvarında uygulanabilir ve sonuç olarak RDE testlerini gerçekleştirmedeki zorlukların üstesinden gelinebilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2015.** AVL PN PEMS iS User Manual. AT6405E
- Anonim, 2016.** AVL Gas PEMS iS User Manual. AT6103E
- Anonim, 2017.** Commission Regulation (EU) 2017/1151. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02017R1151-20200125>. (Erişim tarihi: 11.02.2021).
- Anonim, 2019.** Commission Regulation (EU) 2019/631. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R0631-20210111>. (Erişim tarihi: 11.02.2021).
- Anonim, 2020.** 11th International AVL Exhaust Gas and Particulate Emissions Forum katılımı. Ludwigsburg, Almanya. (Konferans tarihi: 3-4.03.2020)
- Asano, I.** Measurement Systems for Diesel Exhaust Gas and Future Trends. HORIBA Technical Report. <https://www.horiba.com/uploads/media/RE03-03-012-600.pdf>. (Erişim tarihi: 14.02.2021).
- Bodisco, T., Zare, A., 2019.** Practicalities and Driving Dynamics of a Real Driving Emissions (RDE) Euro 6 Regulation Homologation Test. Energies.
- Dornoff, J., Rodríguez, F., 2019.** Gasoline versus Diesel: Comparing CO2 Emission Levels Of A Modern Medium Size Car Model Under Laboratory And On-Road Testing Conditions. International Council on Clean Transportation.
- European Commission (EC), 2019.** EU Climate Action and the European Green Deal. https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en. (Erişim tarihi: 18.11.2020).
- European Environment Agency (EEA), 2016.** Explaining Road Transport Emissions: A Non Technical Guide. Publications Office. 978-92-9213-723-6.
- Frosina, E., Romagnuolo, L., Bonavolonta, A., Fortunato, F., Giliberti, P., Andreozzi, A. 2018.** Evaporative Emissions in a Fuel Tank of Vehicles: Numerical and Experimental Approaches. 73rd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association (ATI 2018).
- Hava Kirliliği ve Sağlık Etkileri – Kara Rapor, 2020.** Temiz Hava Hakkı Platformu. <https://www.temizhavahakki.com/wp-content/uploads/2020/09/Kara-Rapor-2020-Son27082020.pdf>. (Erişim tarihi: 21.01.2021).
- Heywood, J.B., 1988.** Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill. 0-07-028637-X.
- Hoofman, N., Messagie, N., Van Mierlo, J., Coosemans, T., 2018.** A Review of the European Passenger Car Regulations – Real Driving Emissions vs Local Air Quality. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- International Council on Clean Transportation (ICCT), 2017.** Real-Driving Emissions Test Procedure for Exhaust Gas Pollutant Emissions of Cars and Light Commercial Vehicles in Europe. Policy Update.
- Kühlwein, J., 2016.** The Impact of Official vs. Real-World Road-Load Parameters in EU Vehicle Efficiency Testing. International Council on Clean Transportation.
- Mellios, G., Smit, R., Ntziachristos, L., 2013.** Evaporative Emissions: Developing Australian Emission Algorithms. ResearchGate.
- Mock, P., Kühlwein, J., Tietge, Y., Franco, V., Bandivadekar, A., German, J., 2014.** The WLTP: How a New Test Procedure for Cars Will Affect Fuel Consumption Values in the EU. International Council on Clean Transportation.
- Ninawe, G., 2015.** Review of Vehicle Emission Measurement and Sampling System. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2347-6710.

- OECD, 2010.** Globalisation, Transport and the Environment, OECD Publishing, Paris. 978-92-64-07919-9.
- Ortiz, A.G., 2020.** Air Quality in Europe: 2020 Report. European Environment Agency. 1977-8449.
- Penkała, M., Ogrodnik, P., Rogula-Kozłowska, W., 2018.** Particulate Matter from the Road Surface Abrasion as a Problem of Non-Exhaust Emission Control. Environments.
- Pulkrabek, W.W., 2004.** Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Pearson Education International. 978-0135708545.
- Soruşbay, C.** İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Gazları Emisyonu Ders Notları. İstanbul Teknik Üniversitesi
- Stone, R., Jeffrey K.B., 2004.** Automotive Engineering Fundamentals. SAE International. 0-7680-0987-1.
- Volkswagen: Self-Study Programme 230 - Motor Vehicle Exhaust Emissions, 2000.** http://www.volkspage.net/technik/ssp/spp/SSP_230.pdf. (Erişim tarihi: 07.12.2020).
- Wappelhorst, S., 2020.** The end of the road? An Overview of Combustion-Engine Car Phase-Out Announcements Across Europe. International Council on Clean Transportation.
- World Health Organization (WHO), 2018.** 9 out of 10 People Worldwide Breathe Polluted Air, but More Countries Are Taking Action. <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>. (Erişim tarihi: 16.11.2020).