

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DİNAMİK MANEVRALARDA MOTORA GİREN TEMİZ HAVA DEBİSİ
KONTROLÜNÜN EMİSYONLARA OLAN ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuz ŞAFAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Programı

TEMMUZ 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**DİNAMİK MANEVRALARDA MOTORA GİREN TEMİZ HAVA DEBİSİ
KONTROLÜNÜN EMİSYONLARA OLAN ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Oğuz ŞAFAK
(503181713)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Otomotiv Programı

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Osman Akın KUTLAR

TEMMUZ 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503171813 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Oğuz Şafak, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DİNAMİK MANEVRALARDA MOTORA GİREN TEMİZ HAVA DEBİSİ KONTROLÜNÜN EMİSYONLARA OLAN ETKİLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ARSLAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Orkun ÖZENER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 02 Haziran 2021
Savunma Tarihi : 02 Temmuz 2021





Sevgili Eşime,



ÖNSÖZ

Bu çalışmada, dinamik araç manevralarında motorda talep edilen hava debisinin düşürülerek EGR akışının sağlanması sonucunda emisyonların değişimini analiz ettim. Değişken geometrilili aşırı doldurma sistemine sahip 13 litre hacmine sahip, altı silindirli bir motorun dinamik manevralarda aldığı hava miktarını ve emisyon miktarlarını ölçerek model ortamına aktardım. Motor girdilerini kullanarak temiz hava debisi taleplerini kontrol ünitesi yardımıyla kullanıp, dinamik rejim manevralarında talep edilen hava debisinin manipülasyonunu sağladım. Motor dinamometresinde dinamik manevrada emisyon kontrolü açık ve kapalı olacak şekilde hem adım testi hem de emisyon çevrim deneyleri gerçekleştirdim. Bu deney sonuçlarını kullanarak dinamik rejim manevralarında hava debisini azaltarak EGR akışının sağlanmasının kurum ve azot oksit emisyonları üzerine olan etkisini gösterdim. Bu çalışmanın dinamik manevralardaki kontrol stratejisinin sıkılaşan emisyon regülasyonlarına karşı mevcut kontrol yöntemlerine göre daha avantajlı olabileceğini gösterdim.

Hayatımın her aşamasında bana destek olan ve bugünlere gelmemde sonsuz emekleri olan, her zaman daha ilerisini hedeflememi öğütleyen ve benden desteğini hiç esirgemeyen canım aileme en içten dileklerle teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans tezimde, lisans eğitim ve öğretim hayatımın tamamında bana desteğini hiç esirgemeyen, çalışmalarımda karşılaştığım zorluklarda yol gösteren sevgili hocam Doç. Dr. Osman Akın KUTLAR'a teşekkür etmeyi borç bilirim.

Bu çalışma kapsamında imkanlarını esirgmeden sonuna kadar kullanmama müsaade eden, çalışmamda önemli rol oynayan test ve ölçüm merkezinde gerekli çalışmaları yapmama imkan tanıyan Ford OTOSAN ailesine, çalışmalarımda sürekli destek olup elinden gelen yardımı sağlayan çalışma arkadaşım Hüseyin Berk ÖZCAN'a ve ekip liderlerim Tamer ACET'e ve Barkın ÖZENER'e sonsuz teşekkür ederim.

Temmuz 2021

Oğuz ŞAFAK
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISATMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. DİZEL MOTORLARA GİRİŞ	1
1.1 Dizel ve Benzinli Motorlar Arasındaki Farklar	2
1.2 Dizel Motorda Hava Yolu Kontrol Sistemleri	3
1.2.1 Egzoz gazı resirkülasyon sistemi (EGR)	4
1.2.1.1 Yüksek basınçlı EGR sistemi	7
1.2.1.2 Düşük basınçlı EGR sistemi	9
1.2.1.3 Hibrit EGR sistemi	11
1.2.1.4 Reed Valfli EGR sistemi	13
1.2.2 Hava yolu kontrol gereksinimi	15
2. DİZEL MOTORLARDA EGZOZ GAZI EMİSYONLARI	17
2.1 Hidrokarbon (HC) Emisyonları	18
2.2 Karbon Monoksit (CO) Emisyonları	19
2.3 Partikül Madde (PM)	20
2.4 Azot Oksit Emisyonları (NO _x)	25
2.4.1 Azot oksit oluşumunu etkileyen parametreler	27
2.4.1.1 Enjeksiyon zamanlaması	27
2.4.1.2 Hava yakıt oranı	29
2.4.1.3 Püskürtme basıncı	29
2.4.1.4 Egzoz gazı resirkülasyonu	29
2.5 Emisyon Regülasyonları	30
3. MOTOR DENEYİ VERİ ÖLÇÜMÜ	33
3.1 Yakıt Ölçümü	34
3.2 Kütleli Hava Debisi Ölçümü	35
3.3 Gaz Basıncı ve Sıcaklık Ölçümü	36
3.4 Azot Oksit Emisyon Ölçümü	36
3.5 Partikül Madde Ölçümü	37
3.6 Turboşaft Hızı Ölçümü	38
4. DİNAMİK EMİSYON KONTROLÜ	39
4.1 Hedef Nokta Veya Mevcut Noktaya Göre Manipülasyon Yapılması	40
4.2 Çalışma Koşulları, Dinamik Manevra Tespiti Ve Emisyon Stratejisi	40
4.3 Motordaki Temiz Hava Debisinin Hesaplanması	41
4.4 Dinamik Hedef Hava Debisi ve Dinamik EGR Oranının Hesaplanması	41
4.5 Dinamik Manevrada Düzeltilmiş Hava Debisi Hedefi Ayarlama Fonksiyonu	42

4.6 Model Kurulumu ve Doğrulanması.....	42
4.7 Dinamik Hava Debisi Talebinin Optimizasyonla Belirlenmesi	47
5. ADIM VE EMİSYON TESTLERİ SONUÇLARI	49
5.1 Adım Testleri Sonuçları	49
5.1.1 Motor hızının 1000d/d olduğu adım testleri.....	51
5.1.2 Motor hızının 1200d/d olduğu adım testleri.....	57
5.1.3 Motor hızının 1400d/d olduğu adım testleri.....	62
5.1.4 Motor hızının 1600d/d olduğu adım testleri.....	68
5.1.5 Motor hızının 1800d/d olduğu adım testleri.....	73
5.2 Emisyon Testleri.....	76
5.2.1 WHTC	76
5.2.2 PEMS	80
6. SONUÇLAR	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ	89



KISATMALAR

BSFC	: Özgöl yakıt tüketimi
ECU	: Elektronik kontrol ünitesi
EGR	: Egzoz gaz resirkülasyonu
VGT	: Değişken geometrili türbinli aşırı doldurma sistemi
PS	: Metrik beygir gücü
SOI	: Yakıt püskürtme başlangıç açısı
CO₂	: Karbon dioksit
CO	: Karbon monoksit
PM	: Partikül madde
NOX	: Azot oksit
HC	: Hidrokarbon
SCR	: Seçici katalitik indirgeme
AFR	: Hava yakıt oranı
EGAS	: Egzoz gazı arındırma sistemi
DOC	: Dizel oksidasyon katalisti
DPF	: Dizel partikül filtresi
HP EGR	: Yüksek Basıncılı EGR Hattı
LP EGR	: Düşük Basıncılı EGR Hattı
SR EGR	: Kısa yollu EGR Hattı
LR EGR	: Uzun yollu EGR Hattı
EU	: Euro emisyon standardı
WOT	: Tam gaz hızlanma manevrası
IMEP	: İndike ortalama efektif basınç
ÜON	: Üst ölü nokta
EDF	: Emisyon düzeltme faktörü
WHTC	: World Harmonized Transient Cycle
PEMS	: Portable Emission Measurement System



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Emisyon Seviyelerine Göre Sabit Rejimde Emisyon Limitleri [29]. ...	31
Çizelge 2.2 : Emisyon Seviyelerine Göre Geçici Rejimde Emisyon Limitleri [29]..	31
Çizelge 4.1 : Adım testi matrisi.	47





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dizel motor hava yolu kontrolcöleri yerleşimi [3].	3
Şekil 1.2 : EGR oranının özgül yakıt tüketimine etkisi [6].	5
Şekil 1.3 : EGR Oranının Silindir İçi Gaz Sıcaklıklara Olan Etkisi [6].	7
Şekil 1.4 : Yüksek Basınçlı EGR Sistemi [10].	8
Şekil 1.5 : Düşük Basınçlı EGR Sistemi [8].	10
Şekil 1.6 : Hibrit EGR Sistemi [8].	11
Şekil 1.7 : Düşük basınçlı ve yüksek basınçlı EGR Sistemi kıyası [1].	12
Şekil 1.8 : Dinamik manevrada emisyon değişim seviyeleri [12].	13
Şekil 1.9 : Reed valf sisteminde egzoz gazı darbeleri ve doldurma basıncı [17].	14
Şekil 1.10 : EGR Sisteminde Kullanılan Reed Valf Örneği [18].	14
Şekil 2.1 : Yakıt hava oranına göre hidrokarbon emisyonu oluşumu [20].	19
Şekil 2.2 : Yakıt-hava oranına göre karbon monoksit emisyonu oluşumu [20].	20
Şekil 2.3 : Yakıt Damlasında Kurum Emisyonu Konsantrasyonu [20].	21
Şekil 2.4 : Kurum emisyon limitlerinin emisyon seviyesine göre değişimi [20].	22
Şekil 2.5 : Dizel Motorda Kurum ve NOx Emisyonu Arasındaki İlişki [22].	23
Şekil 2.6 : Yakıt-Hava Oranına ve Alev Sıcaklığına Bağlı Kurum ve NOx [23].	24
Şekil 2.7 : Dizel Motorda Kurum ve NOx Emisyonu Arasındaki İlişki [24].	24
Şekil 2.8 : Enjeksiyon Zamanlamasına göre silindir içi basıncının değişimi [26].	28
Şekil 2.9 : Enjeksiyon zamanlamasına göre kurum ve NOx değişimi [26].	28
Şekil 2.10 : Ray Basıncına Bağlı Olarak Azot Oksit Emisyonu Değişimi [27].	29
Şekil 2.11 : EGR Oranına Bağlı Olarak Azot Oksit Emisyonu Değişimi [26].	30
Şekil 3.1 : 735S kütleli yakıt ölçüm cihazı.	34
Şekil 3.2 : Yakıt ölçüm prensibi [31].	35
Şekil 3.3 : Continental kütleli hava ölçüm cihazı ve çalışma prensibi [32].	35
Şekil 3.4 : Kistler 4080BT basınç ölçüm sensörü [34].	36
Şekil 3.5 : AVL AMA Emisyon Ölçüm Cihazı [35].	37
Şekil 3.6 : AVL MicroSoot Emisyon Ölçüm Cihazı [36].	37
Şekil 3.7 : Turboşaft Hızı Ölçümü [37].	38
Şekil 4.1 : Adım testinde dinamik manevra parametrelerinin Matlab'da gösterimi.	43
Şekil 4.2 : Düzeltilmiş hedef hava debisi ve durağan haldeki hedef hava değeri.	45
Şekil 4.3 : Motora giren hava miktarı ve motor hızı.	45
Şekil 4.4 : Doldurma basıncı oranı.	46
Şekil 4.5 : Dinamik fonksiyonun aktif olup olmadığı durumdaki sonuçlar.	48
Şekil 5.1 : Motor dinamometresinde gerçekleştirilen örnek adım testi.	50
Şekil 5.2 : %0 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.	51
Şekil 5.3 : %0 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.	51
Şekil 5.4 : %0 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.	52
Şekil 5.5 : %0 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.	53
Şekil 5.6 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.	53
Şekil 5.7 : %35 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.	54
Şekil 5.8 : %35 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.	54
Şekil 5.9 : %35 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.	55

Şekil 5.10 : %55 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	56
Şekil 5.11 : %55 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	56
Şekil 5.12 : %0 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.....	57
Şekil 5.13 : %0 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.....	57
Şekil 5.14 : %0 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	58
Şekil 5.15 : %0 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.....	59
Şekil 5.16 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	59
Şekil 5.17 : %35 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.....	60
Şekil 5.18 : %35 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.....	60
Şekil 5.19 : %35 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	61
Şekil 5.20 : %55 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	61
Şekil 5.21 : %55 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	62
Şekil 5.22 : %0 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.....	63
Şekil 5.23 : %0 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.....	63
Şekil 5.24 : %0 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	64
Şekil 5.25 : %0 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.....	64
Şekil 5.26 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	65
Şekil 5.27 : %35 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.....	65
Şekil 5.28 : %35 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	66
Şekil 5.29 : %35 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	67
Şekil 5.30 : %55 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	67
Şekil 5.31 : %55 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	68
Şekil 5.32 : %0 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.....	68
Şekil 5.33 : %0 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.....	69
Şekil 5.34 : %0 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	69
Şekil 5.35 : %0 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.....	70
Şekil 5.36 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	70
Şekil 5.37 : %35 - %50 pedal pozisyonunda adım testi.....	71
Şekil 5.38 : %35 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	71
Şekil 5.39 : %35 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	72
Şekil 5.40 : %55 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.....	72
Şekil 5.41 : %55 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	73
Şekil 5.42 : %0 - %60 pedal pozisyonunda adım testi.....	74
Şekil 5.43 : %0 - %70 pedal pozisyonunda adım testi.....	74
Şekil 5.44 : %0 - %80 pedal pozisyonunda adım testi.....	75
Şekil 5.45 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.....	75
Şekil 5.46 : WHTC emisyon çevriminde motor hızı ve tork değerleri.....	76
Şekil 5.47 : WHTC emisyon çevriminde başlangıç ve sınır koşulları.....	77
Şekil 5.48 : Dinamik manevrada motora giren temiz hava miktarı farkı.	77
Şekil 5.49 : WHTC emisyon çevriminde motor çıkış azot oksit emisyon değerleri.	78
Şekil 5.50 : WHTC emisyon çevriminde motor çıkış kurum emisyonu değerleri. ...	79
Şekil 5.51 : WHTC emisyon çevriminde egas sonrası azot oksit emisyon değerleri.....	80
Şekil 5.52 : PEMS testinde motor çıkış azot oksit emisyon değerleri.....	81

DİNAMİK MANEVRALARDA MOTORA GİREN TEMİZ HAVA DEBİSİNİN AZALTILMASININ EMİSYONLARA OLAN ETKİLERİ

ÖZET

İçten yanmalı motorlar icat edildikten sonra endüstride ve bir çok farklı alanda yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Gün geçtikçe iş gücünde artan gereksinim ve ihtiyaca karşılık verebilmek için içten yanmalı motorlar bir çok geliştirmeyle beraber günümüzdeki modern hallerine ulaşmıştır. Geliştirmeler yapılırken dayanıklılık, verimlilik, parça ve bakım maliyeti, ses ve titreşim düzeyleri gibi bir çok parametre gözetilmiştir. İçten yanmalı motorların kullanımındaki artışa bağlı olarak, yakıt tüketimi ve özellikle çevre kirliliğinin önüne geçebilmek adına emisyon regülasyonları sıkı bir tasarım parametresi haline gelmiştir.

Günümüzde içten yanmalı motorlar teknolojik olarak büyük bir devrim geçirmiştir. Yakıt tüketimini azaltmak ve birim hacimden maksimum verimi alabilmek adına hacim küçültmeye gidilmiştir. İlkel motorların yanı sıra hava atmosferik olarak değil, aşırı besleme sistemleriyle motora gönderilmeye başlanmıştır. Sabit geometrilili aşırı doldurma sisteminde pompalama kayıplarını daha iyi yönetebilmek adına değişken geometrilili aşırı doldurma sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. İçten yanmalı motorların kullanımının artışına bağlı olarak, egzoz atık gazlarında çevreyi kirlletici maddelerin oluşumunun önüne geçmek ve bunları engelleme zorunluluğu doğmuştur. Emisyonların belirli bir strateji ile takip edilebilmesi, limitlerinin belirlenebilmesi amacıyla çeşitli komiteler oluşturulmuş ve bu çalışmaların sonucunda emisyon limitleri belirlenmiştir.

İçten yanmalı motorların geliştirilmesinde yanma verimi ve dolayısıyla yakıt tüketimi büyük rol oynarken, emisyon regülasyonlarının da sıkışmasıyla motorların ve araçların egzoz gazı emisyonları büyük bir tasarım problemi haline gelmiştir. Dizel motorların yanma prensibi gereği egzoz gazlarında yüksek miktarlarda barındırdığı azot oksit ve kurum emisyonların azaltmak için çok fazla çalışma yapılmakta olup, bu ve diğer emisyonlar regülasyonlarla limitlenmiştir. Avrupa bölgesi standartlarına göre oluşturulmuş Euro 5 emisyon seviyesiyle beraber, ağır ticari taşıt motorlarında azot oksit emisyonlarını azaltabilmek adına, egzoz gazı arındırma sistemi kullanılmaya başlanmıştır. Motor çıkışındaki azot oksit gazı, egzoz gazı arındırma sistemi içerisinde yer alan, seçici katalitik konvertör adı verilen sisteme üre püskürtülmesiyle doğaya atılabilecek forma getirilmekte ve emisyon limitlerini aşmayacak seviyelerde tutulmaktadır. Euro 6 emisyon seviyesiyle beraber, motor çıkışındaki önlemlere ek olarak, egzoz emisyonları motor yanmasına müdahale edilerek azaltılmaya çalışılmıştır. Bunun için egzoz gazı resirkülasyonu adı verilen sistem kullanılmaya başlanmıştır. Azot oksit emisyonlarının oluşumunda büyük role sahip olan yanma sonucu sıcaklıklarını azaltmak ve fazlalık olan havayı seyreltip yanma odasına aktif reaksiyona giremeyecek olan egzoz atık gazları beslenmiştir. Bu sayede yanma sonucu sıcaklıkları azaltılmış ve azot oksit emisyonlarına düşüş sağlanmıştır. Buna ek olarak, emme odasına geri beslenen egzoz gazlarını soğutmak amacıyla bir ara soğutucu ve bu gazların debisini yönetebilmek adına valf eklenmiştir. Motor çıkışında azot oksit emisyonlarını azaltmak için uygulanan yöntemlerle beraber, partikül madde olarak

bilinen kurum emisyonlarında artış meydana gelmektedir. Euro 6 emisyon seviyesiyle beraber kurum emisyon limitleri sıkılaşıp ve egzoz gazı arındırma sistemi içerisinde dizel partikül filtresi kullanılarak kurum emisyonları limitler içerisinde tutulmaya çalışılmıştır. Partikül madde dizel partikül filtresinde tutularak havaya atılması önlenmektedir.

Günümüzde Avrupa normları için kullanılan Euro 6 emisyon seviyesinde egzoz emisyonları çeşitli testler vasıtasıyla ölçülmektedir. Testler temel olarak iki rejimden oluşmaktadır. WHSC ve WNTS testleri motorun sıcak ve sabit rejimde çalıştırılarak emisyon ölçümü alınmasıyla uygulanmaktadır. Müşterinin gerçek yol sürüş koşullarını yansıtmak içinse dinamik rejime sahip WHTC adı verilen çevrim test edilmektedir. Sabit motor devir ve hızında, motordaki tüm kontrolcüler sabit rejimli davranış gösterip, basınç ve sıcaklık olarak sabit rejime ulaşmaktadır. Ancak dinamik rejime sahip olan, sürekli olarak hızlanma ve yavaşlama manevralarına sahip, egzozun soğuma davranışı göstereceği boşta beklemeye sahip test çevrimleri emisyonlar açısından daha zorlayıcıdır. Dolayısıyla emisyon azaltma çalışmalarında asıl zorluk geçici rejim manevralarında olabildiğince düşük emisyon seviyelerine sahip olabilmektedir. Buradaki zorluk, motorun sabit rejimde sürekli olarak çalışmaması sebebiyle egzoz gazı arındırma sisteminin görevini yerine getirecek kadar ısınmaması ve ek olarak motorun geçici rejimde çalışması sebebiyle sabit rejimli koşullardan görece daha fazla emisyon oluşturmalarıdır. Dolayısıyla dinamik manevralarda egzoz gazı arındırma sisteminin soğuk olması sebebiyle verim alınamadığı durumda motor çıkış emisyonlarını azaltmak, dinamik manevralarda emisyon düşürebilmek için önemlidir.

Aşırı beslemeli dizel motorlarda dinamik manevranın başlangıcında emme hattında yeterince hava olmadığından, egzoz hattı da havanın ataleti bakımından yetersiz kalır. Dolayısıyla aşırı doldurma sistemi emme hattını basınçlı hava ile doldurana kadar belirli bir gecikme yaşanır. Egzoz gazı resirkülasyonu uygulanan motorlarda dinamik manevrada talep edilen havanın tamamı temiz hava ile karşılanmak istenirse, EGR valfi atık gaz akışına izin vermeyecek yönde kapanır. Dinamik manevralarda emisyon tepelerinin oluşmasında başlıca nedenlerden biri de motorun dinamik manevra esnasında yüksek hacimde atık gazsız temiz hava almasından kaynaklanır. Yapılan çalışmada dinamik manevrada talep edilen temiz hava miktarı azaltılarak motorun dinamik manevrada egzoz gazı resirkülasyonu yapması sağlanmıştır. Temiz hava talebi sabit bir katsayıyla manipüle edilerek dinamik manevra esnasında talep edilen temiz hava miktarı düşürülmüştür. Temiz hava talebini manipüle edecek katsayıların bulunması için bir model kurulmuş olup, katsayılar motorun tamamen temiz hava aldığı durumun test sonuçlarının optimizasyonu ile belirlenmiştir. Motorun tamamen temiz hava aldığı ve EGR kullandığı durumların testini yapabilmek adına adım testleri uygulanmıştır. Motor belirli bir devir ve pedaldan başka bir hedef pedal ve motor devrine götürülmüş, motor çıkışında oluşan emisyonlar sürekli olarak kayıt edilmiştir. EGR akışının sağlanabildiği dinamik manevralarda temiz hava talebini düşürmenin azot oksit emisyonlarını azaltacak yönde etki ettiği gösterilmiştir. EGR akışının sağlanmasına bağlı olarak kurum emisyonlarında oluşan artış gösterilmiştir. Kıyas yapılırken büyük bir devir aralığında adım testleri gerçekleştirilmiş olup, bunun yanında emisyon regülasyonlarına ait dinamik çevrimler olan WHTC ve PEMS testleri deneyde kullanılmıştır. Ani hızlanma ve yavaşlamaların olduğu, motorun boş durumda beklediği ve dolayısıyla egzoz gazının soğuduğu durumlardan ani olarak hızlanma manevraları içeren test çevrimlerinde, motora alınan temiz havanın düşürülmesi durumunda azot oksit emisyonlarına iyileşme olduğu gösterilmiştir.

EMISSION EFFECTS OF DECREASING INTAKE AIRFLOW DURING TRANSIENT MANEUVERS

SUMMARY

After the internal combustion engines were invented, they started to be widely used in industry and in many different areas. In order to meet the increasing needs in the workforce day by day, internal combustion engines have reached their modern state with many developments. While making improvements, many parameters such as durability, efficiency, parts and maintenance costs, noise and vibration levels were taken into consideration. Due to the increase in the use of internal combustion engines, emission regulations have become a strict design parameter to prevent fuel consumption and especially environmental pollution.

Today, internal combustion engines have undergone a great technological revolution. In order to reduce fuel consumption and get maximum efficiency from unit volume, downsizing applications has been made. In addition to primitive engines, fresh air started to be sent to the engine not atmospherically, but by super charger systems. An intercooler was used and the air was cooled in order to get the maximum combustion efficiency from the air taken to the engine with the turbocharging system. In order to better manage pumping losses in the fixed geometry turbocharging system, variable geometry turbocharging systems have been used. In addition, in order to increase the combustion efficiency and to get the maximum benefit from the fuel, the injection strategy in the gasoline engine is based on direct injection from multiple points and very high pressurization of the fuel in the rail line in diesel engines. The use of internal combustion engines was not limited to industry, but was used for transportation purposes. Due to the increase in the world population, in addition to the improvements made to increase the combustion efficiency, it has become obligatory to reduce and prevent the formation of environmental pollutants in the exhaust gases. Various committees have been established in order to monitor emissions with a specific strategy and to determine the limits. As a result of these studies, emission limits have been determined. Considering factors such as environmental conditions and environmental pollution factors, emission limits are closely followed with various updates today.

While the combustion efficiency and thus fuel consumption play a major role in the development of internal combustion engines, the exhaust gas emissions of engines and vehicles have become a major design problem with the tightening of emission regulations. With the emission regulations that is created according to regional or country standards, engine technologies have evolved to reduce not only combustion efficiency but also emissions. Due to the combustion principle of diesel engines, a lot of work is being done to reduce the nitrogen oxide and soot emissions that they contain in exhaust gases in high amounts, and these and other emissions are limited by regulations. With the Euro 5 emission level established in accordance with the European region standards, an exhaust gas aftertreatment system was started to be used in order to reduce nitrogen oxide emissions in heavy commercial vehicle engines.

The nitrogen oxide gas at the engine outlet is transformed into a form that can be thrown into the nature by spraying urea into the system called the selective catalytic converter in the exhaust gas aftertreatment system, and is kept at levels that do not exceed emission limits. With the Euro 6 emission level, in addition to the measures at the engine output, the exhaust emissions were tried to be reduced by interfering with the engine combustion. For this, the system called exhaust gas recirculation has been used. Exhaust gases that cannot actively react were fed into the combustion chamber to reduce the temperatures at the end of combustion, which has a major role in the formation of nitrogen oxide emissions, and dilute the excess air. In this way, the post-combustion temperatures were reduced and nitrogen oxide emissions were reduced. In addition, an intercooler has been added to cool the exhaust gases fed back to the intake chamber and a valve to manage the flow of these gases. Together with the methods applied to reduce nitrogen oxide emissions at engine output, an increase in soot emissions known as particulate matter occurs. With the Euro 6 emission level, the soot emission limits were tightened and the soot emissions were kept within the limits by using the diesel particle filter in the exhaust gas aftertreatment system. Particulate matter is kept in the diesel particle filter and is prevented from being thrown into the air. Depending on the usage conditions, engine dynamics and driving conditions, the filling time of the particle filter may change. After the filter reaches a certain filling rate, the exhaust gas temperatures are increased and soot is burned in the filter. In cases where the exhaust gas temperature at the engine outlet is not sufficient, fuel is sprayed at the inlet of the catalyst before the filter, in an attempt to increase the gas temperature at the inlet of the diesel particle filter.

Exhaust emissions at the Euro 6 emission level, which is currently used for European norms, are measured by various tests. According to these test results, it is determined whether the engines comply with the emission regulations. Tests basically consist of two regimens. WHSC and WNTC tests are applied by operating the engine in hot and constant mode and taking emission measurements. In order to reflect the real road driving conditions of the customer, the cycle called WHTC with dynamic regime is tested. At constant engine speed and speed, all controllers in the engine behave in a constant regime and reach a constant regime as pressure and temperature. However, test cycles with dynamic regime, continuous acceleration and deceleration maneuvers, idle standby during which the exhaust will display cooling behavior are more demanding in terms of emissions. Therefore, the main difficulty in emission reduction studies can be to have as low emission levels as possible in transient regime maneuvers. The difficulty here is that the engine does not run continuously in a fixed regime, the exhaust gas aftertreatment system does not get hot enough to fulfill its task, and in addition, the engine operates in transient mode, resulting in relatively more emissions than constant regime conditions. Therefore, in dynamic maneuvers, it is important to reduce engine output emissions when the exhaust gas aftertreatment system is cold and it is critical to reduce emission in dynamic maneuvers.

Since there is not enough air in the intake line at the start of the dynamic maneuver in turbocharged diesel engines, the exhaust line is also insufficient in terms of air inertia. Therefore, there is a certain delay that is called turbolag until the turbocharging system fills the suction line with compressed air. If all the air demanded in dynamic maneuver in engines with exhaust gas recirculation is to be met with clean air, the EGR valve closes in a direction that will not allow the waste gas flow and the throttle valve opens to the end and allows as much fresh air as possible. One of the main reasons for the formation of emission peaks in dynamic maneuvers is that the engine takes in high

volumes of clean air without waste gas during dynamic maneuvering. In the study, the amount of clean air demanded in dynamic maneuver was reduced and the engine was provided with exhaust gas recirculation in dynamic maneuvering. By manipulating the clean air demand with a fixed coefficient, the amount of fresh air demanded during dynamic maneuver has been reduced. A model was established to find the coefficients that would manipulate the clean air demand, and the coefficients were determined by optimizing the test results of the situation where the engine is fully fresh air. Step tests were applied in order to test the conditions where the engine is completely fresh air and EGR is used. The engine was taken to a different target pedal and engine speed from a certain speed and pedal, and the emissions generated at the engine outlet were recorded continuously. In dynamic maneuvers where EGR flow can be achieved, it has been shown that reducing the demand for fresh air has an effect on reducing nitrogen oxide emissions. The increase in soot emissions due to the provision of EGR flow has been shown. While comparing, step tests were carried out in a large speed range, besides, WHTC and PEMS tests, which are dynamic cycles of emission regulations, were used in the experiment. In the regulatory emission test cycles, which include sudden acceleration maneuvers from situations where sudden acceleration and deceleration occur, the engine is idle and therefore the exhaust gas is cooled, it has been shown that there is an improvement in nitrogen oxide emissions if the clean air taken into the engine is reduced.



1. DİZEL MOTORLARA GİRİŞ

Dizel motorların geçmişi, Rudolf Diesel'in 19. yüzyılın sonlarına doğru yaptığı çalışmalara dayanmaktadır. Dizel motor, sıkıştırılmalı yanma prensibi sayesinde farklı kalitede birçok dizel yakıt kullanılarak çalışabilir. Bu sebepten dolayı dizel motorlar icat edildiği tarihten sonra öncelikli olarak genellikle yüksek kalite beklenmeyen ve ucuz dizel kullanımının yaygın olduğu deniz yolu taşımacılığında kullanıldı. Dizel motor, yakıt enjeksiyonu ve yanma prensibi nedeniyle benzinli motora göre daha düşük hızlarda çalışarak daha düşük sürtünme kayıplarına ve daha yüksek mekanik verime sahiptir. Dizel motorda, sıkıştırma çevriminin sonuna doğru basınçlanan sıcak hava silindire püskürtülen dizel yakıt ile etkileşime girer. Dizel motorlar, benzinli motorlardaki gibi stokiyometrik bir hava-yakıt oranında değil, daha geniş bir hava-yakıt oranında çalışabilmektedir. Dizel motorlar, benzinli motorlara göre daha yüksek sıkıştırma oranına sahiptir, bu sebeple çalışma mekanizması gereği daha yüksek termal verime sahiptir. Yukarıdaki tüm özellikler (daha düşük motor devri, daha az pompalama kaybı, fakir hava ve yakıt karışımı, daha yüksek sıkıştırma oranı) dizel motorun benzinli motorlara göre daha yüksek bir termal veriminde çalışmasını sağlar. Bu nedenle, yirminci yüzyılın ilk yarısında, dizel motorlar ulaşımda ve karayolu taşımacılığında hızlı bir ilerleme kaydetti ve ticari araçlar (kamyonlar ve otobüsler) için en verimli güç ünitesi olarak kullanılmaya başlandı. Dizel motorlar, yüksek verimliliğe, dayanıklılığa, güvenilirliğe ve düşük motor devrine ihtiyaç duyan ağır ticari vasıtalarda ve deniz taşımacılığında yoğun bir şekilde kullanılmaya başlandı [1].

Farklı yakıt enjeksiyon yöntemlerine göre, dizel motorlar dolaylı enjeksiyon ve direkt enjeksiyon olarak iki gruba ayrılabilir. Hava emiş yöntemine göre dizel motorlar, atmosferik emişli, mekanik olarak süper şarjlı ve turboşarjlı motorlar olarak sınıflandırılabilir. Soğutma yöntemi olarak dizel motorlarda su soğutma veya hava soğutma kullanılabilir. Gelişmiş dizel motorlar, silindir içerisine direkt enjeksiyonlu, turboşarjlı (sıkıştırılan hava ara soğutma sayesinde emme manifolduna aktarılır) ve su soğutmalı motorlardır. Dizel motorlar, silindir içi azot oksit emisyonu kontrolü ve azot oksit arındırma teknolojisine göre genel olarak EGR (egzoz gazı resirkülasyonu)

sistemine sahip olan veya olmayan, SCR (seçici katalitik indirgeme) sistemine sahip olan ve olmayan motorlar olarak sınıflandırılabilirler. Ayrıca, kullanılan yakıtın tipine veya yakıt uyumluluğuna göre, dizel motorlar hafif sıvı yakıtlı, ağır sıvı yakıtlı veya çok yakıtlı motorlar olarak sınıflandırılır [1]. Bu çalışmada dört zamanlı ağır ticari hizmet tipi, ara soğutmalı aşırı doldurma ve EGR sistemine sahip dizel motor üzerinde deneyler yapılacaktır.

Yakıt verimliliğİ ve sürdürülebilirlik açısından, dizel motorlar ağır ticari vasıtalar (Heavy Duty olarak da adlandırılır) yani kamyonlar ve çekiciler için en popüler ve kullanışlı motor tipi haline gelmiştir. Dizel motorların yanma verimliliklerinin yüksek olmasına ve bu sebeple düşük karbon monoksit (CO₂) emisyonlarına sahip olmasına rağmen, benzinli motorlara göre daha fazla çevre kirliliğİ neden olduğİ bilinmektedir. Dizel motorlardaki yanma mekanizmasında zayıf difüzyon yanması daha fazla kurum emisyonu (PM) üretir ve üç yollu katalistlerin verimini azaltarak, daha yüksek emisyon salınımlarına neden neden olurlar [2].

1.1 Dizel ve Benzinli Motorlar Arasındaki Farklar

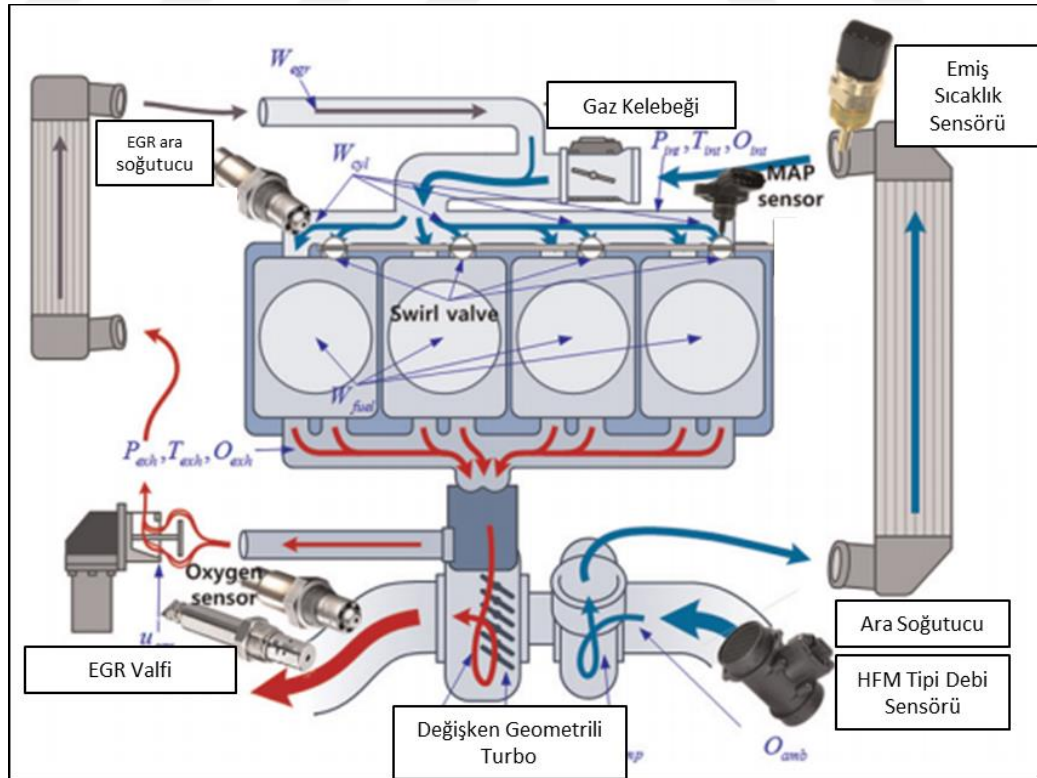
Dizel motorların temel özelliklerini anlamak, motor sistemi tasarımı ve güç aktarım teknolojisi değİerlendirmesi için çok önemlidir. Benzinli motorlara kıyasla dizel motorlar aşğıdaki avantajlara sahiptir: [1].

- Düşük yakıt tüketimi ve düşük karbondioksit (CO₂) emisyonları: Dizel motorlardaki yüksek sıkıştırma oranı, genellikle yüksek termal verimlilik sağlamaktadır, ancak mekanik sürtünmeler ve kayıplar tepe silindir basıncı dolayısıyla artabilir. Dizel motorlar, pompalama kaybının daha düşük olabilmesi için genellikle gaz kelebeğİ açık konumda çalıştırılır. Ancak emisyonları azaltmak amacıyla gaz kelebeğİ pompalama kaybı oluşturmak amacıyla kullanılabilir.
- Yüksek güç: Dizel yanma mekanizması, benzinli motorlarda olduğİ gibi yakıtın istenmeyen noktada kontrolsüz olarak yandığı vuruntu olayı nedeniyle ateşleme limitine sahip değİldir. Bu nedenle dizel motorlarda büyük bir silindir çapı kullanılabilir ve yüksek güç üretmek için yüksek miktarlarda aşırı doldurma basıncıyla çalışabilirler.
- Düşük hızlarda yüksek tork ve daha iyi sürüş koşulları: Dizel motorlar, benzinli motorlara kıyasla yüksek aşırı doldurma basınçlarıyla çalışabildikleri için, daha fazla yakıt püskürtüp, daha yüksek moment üretebilmektedir.

- Dizel motorlar, dizel yanmasının bir gereği olarak kullanılan yüksek hava-yakıt oranı (AFR) nedeniyle daha düşük karbon monoksit ve hidrokarbon (HC) emisyonlarına sahiptir.

1.2 Dizel Motorda Hava Yolu Kontrol Sistemleri

Dizel motorlarda hava yolu sistemi genel olarak emme ve egzoz manifoldu, aşırı doldurma sistemi, aşırı doldurma ara soğutucusu, egzoz gazı resirkülasyon sistemi, gaz kelebeği, egzoz karşı basınç valfinden oluşur. Hava yolu tasarımında temel hedef, hava yakıt oranını, EGR oranını, egzoz gaz sıcaklıklarını ve oksijen oranını kontrol edebilmektir. Ek olarak hava yolu kontrolü ile beraber, hem motor çıkış emisyonları hem de egzoz gazı arındırma sistemi (EGAS) sonrası emisyon değerlerinin limitlerin altında kalması hedeflenir. Hava yolu sisteminin tüm sürüş ve ortam koşullarında, motor çalışma haritasının tamamını kapsayacak şekilde verimli çalışması beklenir. Ayrıca tasarım sürecinde, dizayn limitlerini ihmal etmeden, minimum pompalama kaybı ve düşük özgül yakıt tüketimi (SFC) hedeflenir [1]. Değişken geometrili aşırı doldurma sistemi ve EGR sistemine sahip bir dizel motora ait genel şablon Şekil 1.1’de görülebilir.



Şekil 1.1 : Dizel motor hava yolu kontrolcileri yerleşimi [3].

Atmosferik motorlarla kıyaslandığında, ara soğutmalı aşırı doldurma sistemleri hava-yakıt oranını artırabilir ve kurumu azaltabilir. Kurum emisyonları, yakıt enjeksiyonunun basıncını artırarak büyük ölçüde azaltılabilir. Azot oksit emisyonları, temel olarak EGR kullanılarak ve yakıt enjeksiyon zamanlamasını geciktirerek kontrol edilebilmektedir. Otomotiv ve ağır ticari dizel motor uygulamalarında, geniş bir motor devri aralığında, farklı hava taleplerini karşılamak için sabit geometrili türbin, kademeli olarak wastegated türbin veya değişken geometrili aşırı doldurma sistemleri ile güncellendi. Aşırı doldurma sistemi aynı zamanda EGR sisteminin kullanılmasını da mümkün kılar. Çünkü egzoz manifoldu ve emme manifoldu arasındaki basınç farkı, yüksek basınç hattında konumlanan bir EGR sisteminde EGR gazını akıtabilmek için değişken geometrili aşırı doldurma sistemindeki türbin tarafından değişken olarak kontrol edilebilir. Alternatif olarak, düşük basınçlı EGR sisteminde, EGR'yi emme manifolduna aktarabilmek için bir kompresör kullanılabilir [1].

Günümüzde bir dizel motor, teknolojinin gelişmesiyle beraber sürülebilirliğin avantajlarını korurken, emisyon, titreşim ve gürültü gibi temel sorunları çok iyileştirildiği için temiz yakıt olarak adlandırılmaktadır. Örneğin, dizel motorun emisyonlarını azaltabilmek için dizel motorlarda dizel partikül filtresi (DPF), dizel oksidasyon katalizörü (DOC) ve SCR içeren egzoz arıtma sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, EGR ve VGT sistemleri günümüzde çoğu dizel motorda yaygın olarak kullanılmaktadır. EGR sisteminin, egzoz gazını emme manifolduna yönlendirme görevi vardır. Bu gaz akışı sayesinde NO_x azaltılır ve VGT yardımıyla düşük motor torkunda dahi motor performansı ve verimi artırılabilir. Özellikle, dizel hava yolu sisteminde EGR ve VGT'nin birleşimi, dizel motordaki yanmanın temel parametrelerini kontrol etme imkanı verdiği için, emisyonlar önemli ölçüde azaltılabilmektedir [4].

1.2.1 Egzoz gazı resirkülasyon sistemi (EGR)

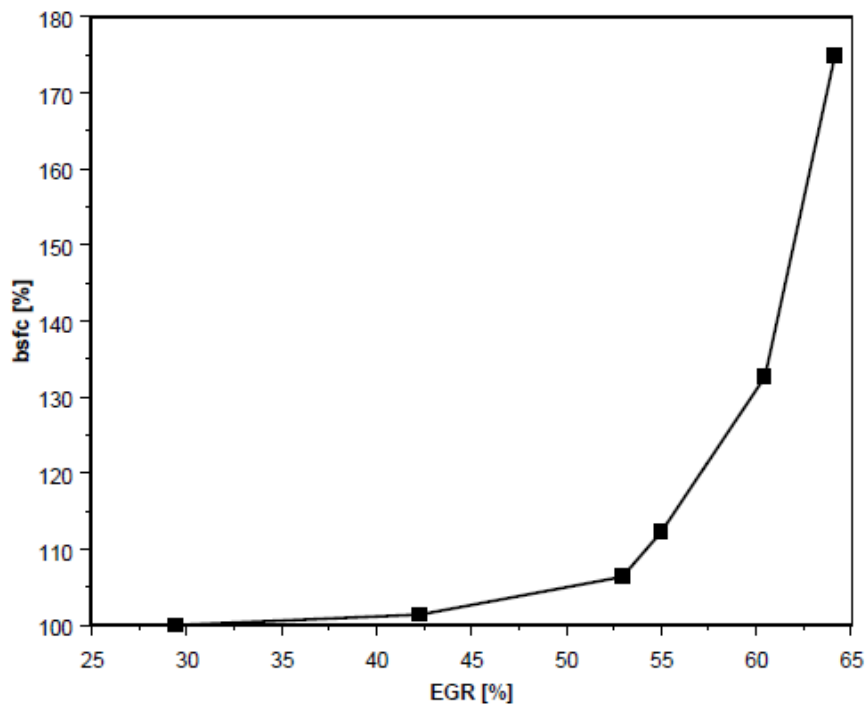
Egzoz gazı resirkülasyon sistemi, genel olarak dizel motor uygulamalarında, özellikle azot oksit, karbon monoksit ve hidrokarbonlardan kaynaklanan emisyonları ve kurum emisyonlarını azaltmak için en etkili yöntem veya tekniklerden biri olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. EGR kullanımı, egzoz gazının bir kısmının, temiz hava girişi ile birlikte dizel motorun sıkıştırma çevriminde enjekte edilen yakıtla birlikte yanması için dizel motorun yanma odasına yönlendirilmesi sayesinde yapılır. EGR, yolcu

otomobilleri, deniz taşıtları ve ağır ticari vasıtalar olmak üzere hemen hemen her tür ulaşım ve taşımacılıkta kullanılan, NOx gazlarında önemli ölçüde azalma sağlayan bir emisyon kontrol sistemidir [5].

EGR sistem tasarımında en önemli tasarım hedefi, motor pompalama ve gaz kayıplarının düşük tutulmasıdır. Modern dizel motorlarda özgül yakıt tüketiminin bağlı olduğu en büyük parametrelerden biri, pompalama kayıplarıdır. Pompalama kaybı kontrolü üç nedenden dolayı kritiktir [1]:

- En geniş tork-yük aralığından, en geniş motor devrine kadar geniş bir hız aralığında yüksek EGR oranlarında en iyi BSFC'yi sağlamak.
- Kurum emisyonlarını azaltmak için hava-yakıt oranını optimum seviyelerde tutmak.
- Tasarım zorluklarının önüne geçmek için maksimum silindir basıncını ve egzoz manifoldu basıncını düşürmek.

Atık egzoz gazlarının silindir içine alınmasıyla yanma reaksiyonu verimsizleştirilmektedir. Ek olarak EGR gazını yönlendirebilmenin ana kaynaklarından biri, pompalama kaybı yaratılması, yani türbin giriş basıncının emme manifoldundaki basınçtan büyük tutulmasıdır. Şekil 1.2’de EGR oranının artışına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değerlerinin değişimi görülebilir.

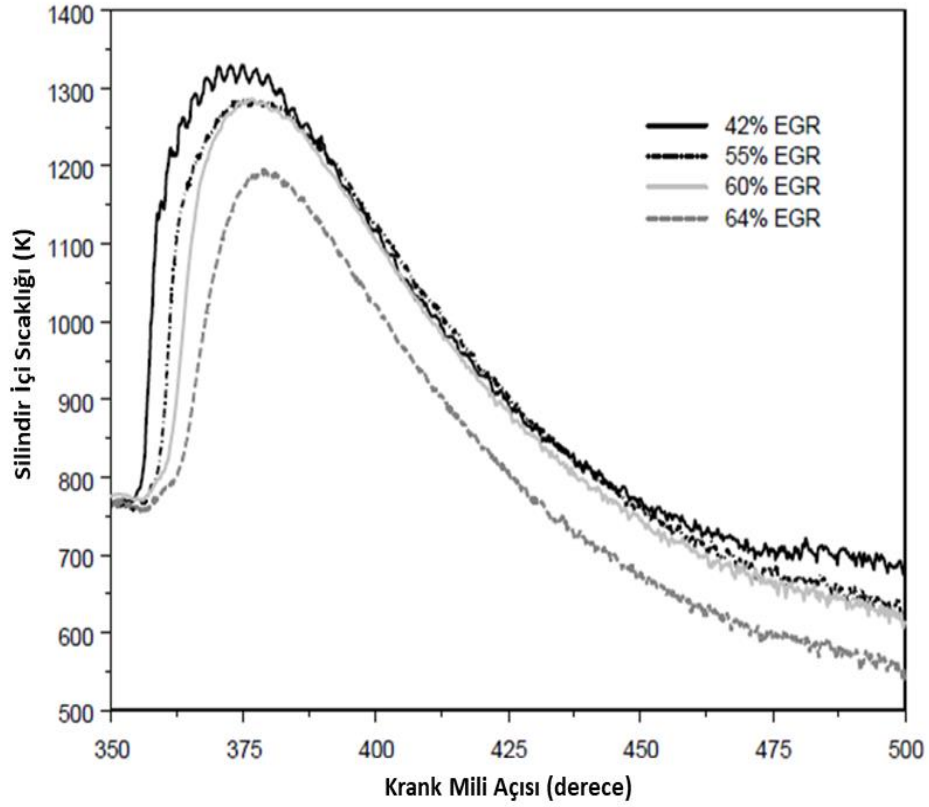


Şekil 1.2 : EGR oranının özgül yakıt tüketimine etkisi [6].

Egzoz gazlarını, egzoz tarafından hava emiş tarafına taşımak için pozitif bir basınç düşüşü gereklidir. Yüksek yüklerin olduğu sürüş noktalarında, aşırı doldurma sistemi yüksek verimlilikle çalıştığından, bu da egzoz karşı basıncından daha büyük bir doldurma basıncı oluşturduğundan, EGR akışını sağlamak zor olabilir. Bu sorunun çözemenin bir yolu, EGR akışını sağlayabilmek için gereken basınç düşüşünü oluşturmak adına gaz kelebeği kullanmaktır. Gaz kelebeği motorun egzoz çıkışında veya emme tarafında konumlandırılabilir. Bu yöntemin olumsuz yanı, daha yüksek pompalama kayıplarına yol açması ve dolayısıyla yakıt tüketimini arttırmasıdır. Yüksek doldurma basıncını yüksek EGR oranlarıyla birleştirmek için, farklı EGR sistemleri kullanılabilir [7].

Dizel motorda egzoz gazları içerisinde her zaman oksijen vardır, ancak yanma dolayısıyla oksijen oranları temiz havadan daha düşüktür. Yanma sonu gazları, üç atomlu inert gazlar olan karbondioksit ve su buharı açısından daha büyük bir orana sahiptirler. Egzoz gazlarının emme havası ile karıştırılmasıyla, silindir içine alınan havanın oksijen oranı düşürülür. Bu işlem farklı etkilerle yanma sıcaklığının düşmesine yol açar. Emiş havası egzoz gazı ile seyreltikçe, ihtiyaç duyulan oksijen miktarını içeren gaz kısmının kütlesi büyür. Yakıt moleküllerinin reaksiyona girmeleri gereken oksijen moleküllerini bulmak için daha büyük hacimde gazla karışması gerekir. Aynı yakıt miktarının sahip olduğu enerji bu nedenle EGR kullanılmadığı duruma göre daha büyük bir gaz bölümünü ısıtmak için kullanılır ve bu sayede son sıcaklıklar düşer. Diğer bir etki, ısı sıvısındaki değişiktir. CO₂ molekülünün daha yüksek serbestlik derecesine sahip olması sebebiyle, egzoz gazı havadan daha yüksek özgül ısıya sahiptir. Dolayısıyla, aynı miktarda yanma ısısı için, EGR içeren bir gaz kütlesi, temiz havadan daha düşük bir sıcaklığa sahip olacaktır [6]. Şekil 1.3’de krank-mili açısına göre farklı EGR oranlarında silindir içi sıcaklıkları görülebilir. NO_x oluşum hızı büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olduğundan düşük yanma sıcaklığı doğrudan NO_x oluşumunu azaltır [8].

Dizel motorlardan kaynaklanan NO_x emisyonları insan sağlığı ve çevre üzerinde zararlı etkilere sahiptir ve bu nedenle katı yönetmeliklerle sınırlandırılmıştır. Emisyon regülasyonlarını karşılamak için, motor tarafında alınan önlemler ile egzoz gazı arındırma işlemi birleştirilmelidir. En etkili önlemlerden biri olan EGR, iki farklı yolla elde edilebilir.



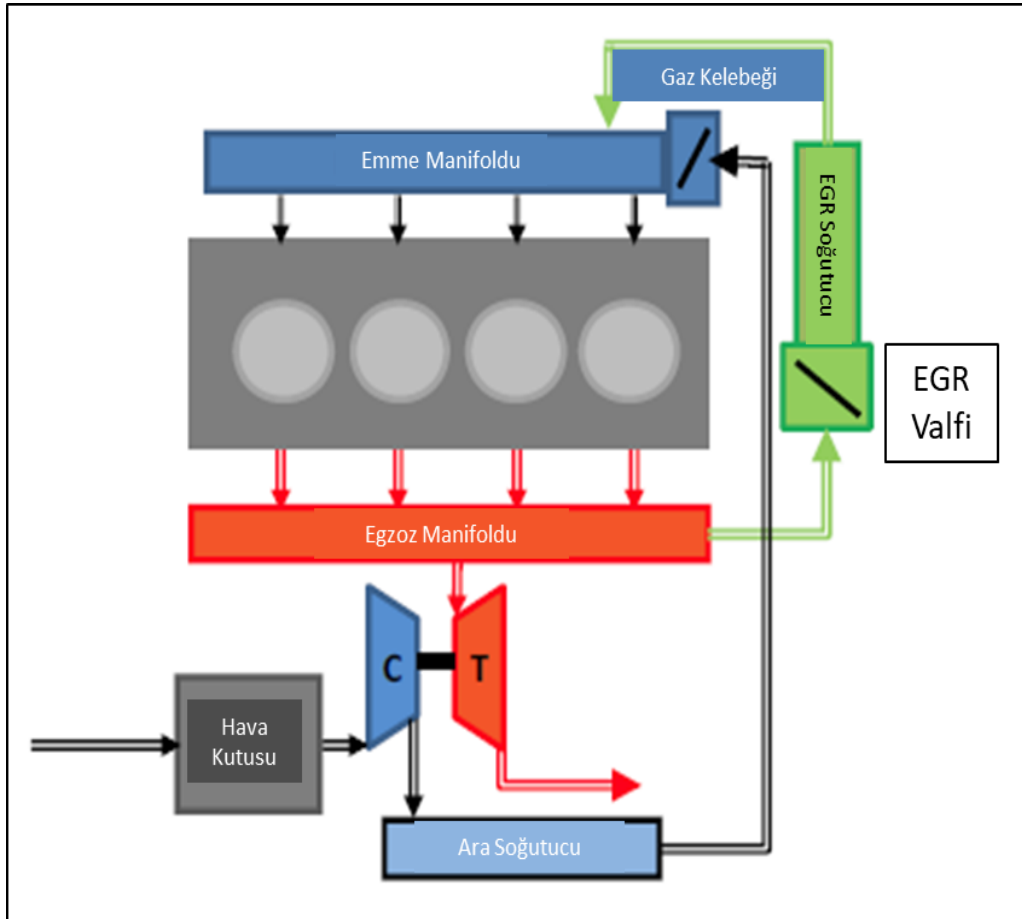
Şekil 1.3 : EGR Oranının Silindir İçi Gaz Sıcaklıklara Olan Etkisi [6].

Bunlardan birincisi yüksek basınçlı yolla (yüksek basınçlı egzoz gazı devridaimi, HP-EGR), egzoz gazı türbinin yukarı yollu akışından kompresörün aşağı yollu akışına iletilir. Diğer yöntem de düşük basınçlı sistem ile (düşük basınçlı egzoz gazı resirkülasyonu, LP-EGR) egzoz gazı türbinin ve egzoz gazı arındırma sisteminin aşağı yollu akışından kompresörün yukarı yollu akışına geri gönderilir. Son zamanlara kadar, geleneksel dizel motorlarındaki uygulama HP-EGR olsa da, modern aşırı doldurmalı Euro 6 dizel motorlar, yalnızca tek aşamalı değil, alternatif veya aynı anda her iki sistemi de içerebilmektedir [9].

1.2.1.1 Yüksek basınçlı EGR sistemi

Yüksek basınçlı EGR sistemi, günümüzün hem binek hem de ağır ticari dizel motorlarda en çok kullanılan sistemdir. EGR, emme manifoldundaki girişe düşük basınçlı sisteme göre kısa yoldan geri dönerek, aşırı doldurma sisteminde kompresörün yüksek basınç tarafına yönlendirildiği için kısa yollu (SR – Short Route) EGR sistemi olarak da adlandırılır. Yüksek basınçlı EGR sisteminde, bir valf yardımıyla egzoz manifoldundan gelen egzoz gazlarının bir kısmı temiz hava ile karıştırılacağı emme

manifolduna yönlendirir. Sistem genellikle bir veya daha fazla EGR soğutucusu ve EGR akış miktarını düzenlemek için bir valf içerir. EGR valfi, EGR soğutucusunun sıcak veya soğuk tarafına yerleştirilebilir. Sıcak tarafa yerleştirme, egzoz darbeleri daha küçük hacimde daha az sönümlendiğinden, türbine daha fazla enerji vererek dinamik manevralarda avantajlar sağlar. Soğuk tarafa yerleştirilmesi, daha soğuk bir ortama yerleştirileceği için EGR valf dizaynını ve seçimini kolaylaştırır. Soğuk koşullar için EGR soğutucu atlanarak direkt manifolda yönlendirilebilir. Böylece soğuk havalarda motorun hızlı ısınması istendiğinde, EGR soğutucu pas geçilerek, direkt olarak emme manifolduna ulaşır ve zaten soğuk olan motor çıkış gazlarının soğutulmasının önüne geçilir [8].



Şekil 1.4 : Yüksek Basıncılı EGR Sistemi [10].

Yüksek basınçlı EGR sistemi, egzoz manifoldundan emme manifolduna EGR akıtabilmek için aşırı doldurma sistemi tarafından oluşturulan basınç farkını kullanır (türbin giriş basıncı ve emme manifoldu basıncı farkı). EGR akışını sağlamak için manifoldlar arasında pozitif bir basınç düşümü fiziksel olarak gereklidir. Eğer daha yüksek bir EGR oranı isteniyorsa, HP EGR sistemde EGR akıtabilmek için daha

yüksek pompalama kaybı oluşturmak gerekir. Modern dizel motorların, NO_x ve kurumla ilgili sıkı emisyon regülasyonlarını sağlamak için yüksek bir EGR oranı ve en yüksek torktan, en yüksek güce kadar yeterli hava-yakıt oranına sahip olması gerekir. Sabit geometrili bir türbin, en düşük seviyede EGR sistemi akış kısıtlamasıyla (örneğin EGR valfi tamamen açıksa) kullanılacaksa, türbin alanı genellikle gerekli EGR oranını en yüksek torkta sağlayacak kadar küçük boyutta seçilir [1].

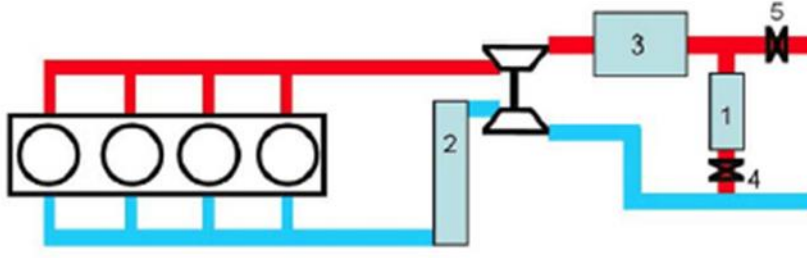
Ağır ticari dizel motorlarında HP EGR sisteminin avantajı, sistemin basit ve dinamik manevralarda tepkisinin hızlı olmasıdır. Dezavantajları ise, genellikle en yüksek torkta motor pompalama kaybı oluşturularak, büyük bir EGR akışının sağlanması gerekliliğidir. Gelişmiş bir EGR sistemi, daha düşük bir pompalama kaybıyla ve daha yüksek aşırı doldurma verimliliğine ulaşarak EGR akışını sağlamalıdır. EGR'nin en yüksek torkta veya düşük motor hızlarında daha iyi akmasını sağlamaya yardımcı olmak için, LP EGR veya çift döngülü EGR sistemini kullanmak daha iyi bir yöntem olabilir. Böylece yüksek hızlarda yüksek pompalama kaybını önlemek için daha büyük bir türbin alanı seçilebilir. Ancak, aşırı geniş bir türbin alanının yüksek irtifada gerekli hava-yakıt oranını sağlayamayabileceği hesaba katılmalıdır [1].

1.2.1.2 Düşük basınçlı EGR sistemi

Modern motorlar, egzoz gazının doğrudan egzoz manifoldundan alındığı, motora girmeden hemen önce temiz aşırı doldurma havası ile birleştirildiği yüksek basınçlı EGR sistemi kullanır. Daha geniş bir motor devri ve yükünde EGR sistemini kullanmak ve EGR oranını artırmak NO_x emisyonlarını daha da azaltır, ancak yüksek basınçlı EGR sistemlerinin de çalışma aralığı kısıtlıdır[11].

Düşük basınçlı EGR, yüksek basınçlı EGR sistemlerine kıyasla gelişmiş ısı transferi sağlar ve aşırı doldurma sistemleri için daha verimlidir. Bu özelliklerin modern dizel motorlarda NO_x, kurum ve yakıt tüketimi düşürmede daha avantajlı olduğu gösterilmiştir. Dezavantajlardan biri, görece daha uzun EGR yolu nedeniyle dinamik manevralarda tepki süresi daha uzundur. Bu durumun etkisi hibrit EGR sisteminde düşük basınç ve yüksek basınç sistemlerini birleştirerek azaltılabilir, ancak dinamik manevralardaki tepki süreleri kontrol stratejisinin tasarımında dikkate alınmalıdır [12].

Şekil 1.5'de düşük basınçlı EGR sisteminin şematik gösterimi görülebilir. Yüksek basınçlı hatta kıyasla EGR akışının sağlandığı yer türbin sonrasında yer alan DPF çıkışıdır.



1: EGR Soğutucu, 2: Ara Soğutucu, 3: DPF, 4: EGR Valfi, 5: Egzoz Kelebeği

Şekil 1.5 : Düşük Basıncılı EGR Sistemi [8].

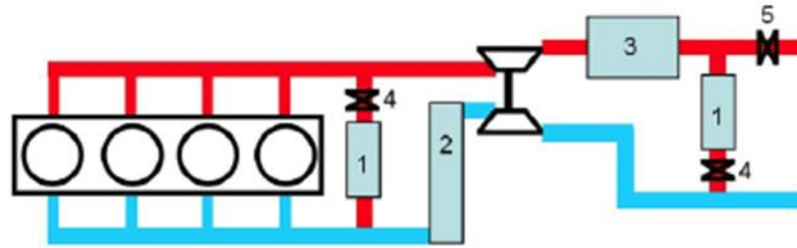
LP EGR sisteminde EGR, aşırı doldurma sisteminde türbinden geçtikten sonra kompresörün emiş kısmına akar. Bu nedenle, uzun yol (LR – Long Route) EGR sistemi olarak da adlandırılır. Düşük basınçlı EGR sistemine ait sistem düzeni Şekil 1.5'ta görülebilir. EGR gazının türbin sonrasında aktarılması, tüm egzoz akışı türbinden geçtiği için aşırı doldurma sistemine daha yüksek bir güç sağlar. Öte yandan, hem EGR'nin hem de temiz havanın sıkıştırılması gerektiğinden, kompresörde daha yüksek bir gaz geçişi sağlanır. Düşük basınçlı sistemde, aşırı doldurma ara soğutucusunun da geçen egzoz gazlarına dayanıklı olması gerekir. Özellikle kompresör hassas bir parçadır. Yoğuşma nedeniyle oluşabilecek herhangi bir damla muhtemelen kompresör pervanelerine zarar verebilir. Bu nedenle, EGR soğutucusu yoğunlaşmayı önleyecek yönde seçilmelidir. Ek olarak, LP sistemindeki tıkanma sorunu, EGR gazını DPF sonrası olarak önlenebilir. Bu sayede, EGR akışı kurum açısından düşük yoğunlukta olur ve soğutucunun tıkanma riski önlenebilir [8].

Düşük basınçlı sistemde hem türbin hem de kompresörden geçen kütlenin artışı önemlidir. Özellikle EGR oranlarının yüksek ve gaz akışının küçük olduğu motorun düşük yük bölgelerinde, aşırı doldurma sisteminin çalışma bölgesi daha verimli noktalara taşınır. Bu durum yüksek basınçlı EGR sistemine kıyasla motorun yakıt ekonomisini iyileştirmeye yardımcı olur [13]. Yakıt tüketimini azaltmaya yardımcı olan bir diğer nokta da düşük basınçlı EGR sistemindeki daha yüksek soğutma kapasitesidir. EGR gazı, EGR soğutucusu ve ara soğutucu tarafından soğutulduğunda, LP sistemi için giriş sıcaklıkları daha düşük olacak ve böylece yanma odasındaki ısı kayıplar azaltılabilecektir. Ek olarak, EGR'nin silindirler arasındaki dağılımı, yüksek basınçlı sisteme kıyasla düşük basınçlı sistem için daha düzenlidir [14].

1.2.1.3 Hibrit EGR sistemi

Hibrit EGR sistemi, Şekil 1.6'da gösterildiği gibi, yüksek ve düşük basınçlı EGR sisteminin bir araya gelmesiyle oluşur. Bu şekilde iki sistemin birlikte kullanılmasıyla, gerçek sürüş koşullarına en uygun EGR sistemini kullanmak mümkündür. Her iki sistemin en efektif olduğu çalışma noktaları kullanılarak belirli yük noktalarında en iyi motor verimliliği sağlanabilir. Geçici rejim manevraları için, hibrit sistem en hızlı yanıtı verir ve emisyonlarda sistemin tekli durumuna göre iyileşme sağlar [15].

Hibrit sistem, soğuk koşullar veya düşük motor yükü gibi belirli durumlarda manifolda giren EGR sıcaklığını artırmak için soğutulmamış bir yüksek basınç akışıyla da kullanılabilir. Bu şekilde, egzoz gazları daha yüksek bir sıcaklığa ulaşarak sisteminin daha sağlıklı ve düzgün çalışmasına yardımcı olur, ek olarak EGR ve aşırı doldurma soğutucusu veya manifold tarafında oluşan sıcaklık farklılığı sebebiyle oluşabilecek yoğunlaşma riskini azaltır [16].

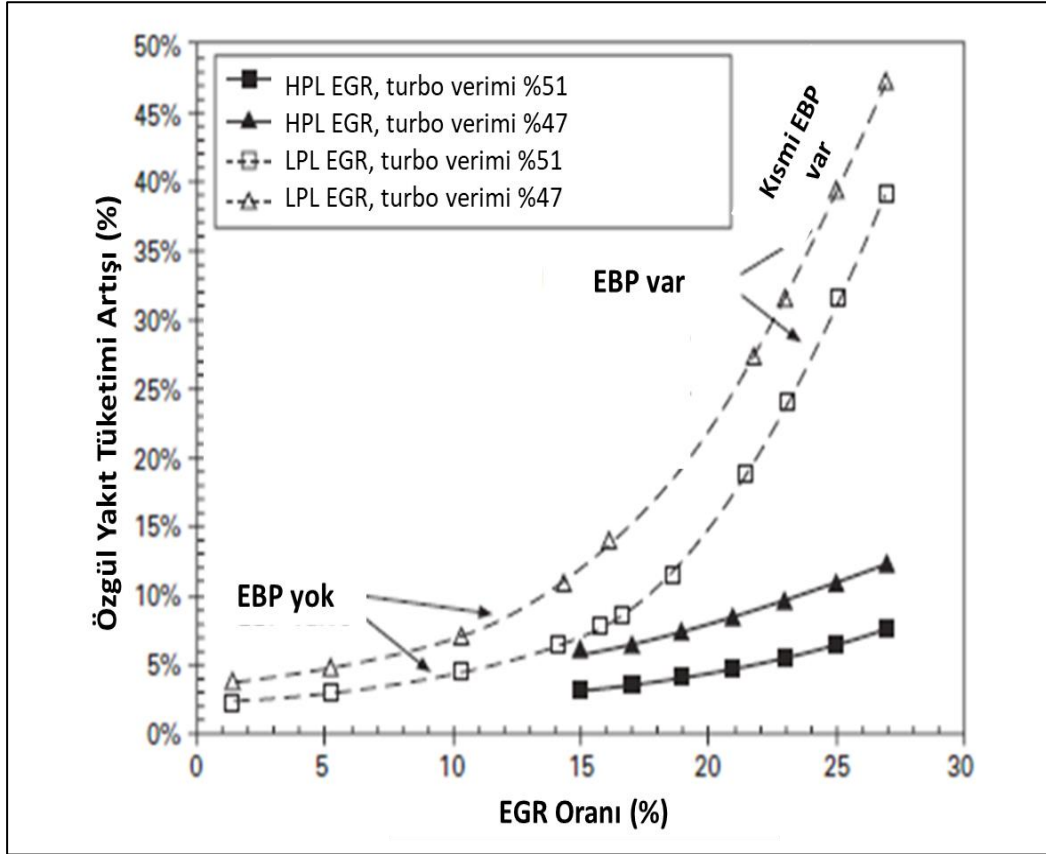


1: EGR Soğutucu, 2: Ara Soğutucu, 3: DPF, 4: EGR Valfi, 5: Egzoz Kelebeği

Şekil 1.6 : Hibrit EGR Sistemi [8].

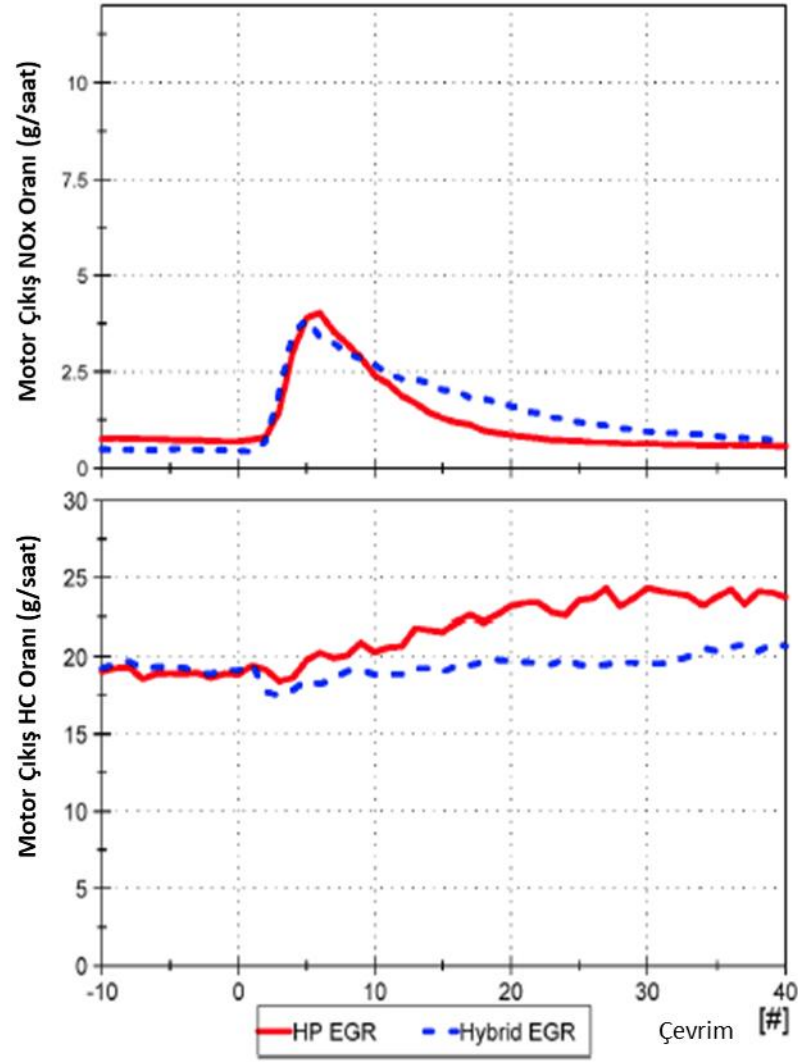
Yüksek motor devirlerinde ve yüksek EGR oranına sahip yüksek motor yüklerinde, HP EGR, düşük türbin gücü ve pompalama kaybı nedeniyle genellikle LP EGR'dan daha üstündür. Düşük motor devrinde, düşük yüklerde veya düşük EGR akışında kompresör daha yüksek verimlilikte eşlenirse LP EGR bazı avantajlar sağlayabilir. Hibrit EGR, hem düşük hem de yüksek basınç EGR sisteminin avantajlarını bir araya getirir ve pompalama kayıplarını en aza indirir. Buna karşın, tasarım zorluğu ve üretim maliyeti artar. Hibrit bir EGR sistemine olan ihtiyaç iki durum için çok önemli hale gelir. Birincisi, aşırı doldurma sisteminin verimliliği düşükse ve talep edilen aşırı doldurma basıncını sağlayabilmek için küçük bir türbin alanının kullanılması gerekiyorsa, oluşan pompalama kaybı, EGR'ı akıtabilmek için kullanılabilen bir basınç farkı haline gelir.

Bu durumda, HP EGR'nin kullanılması gerekir ve EGR oranının dengesi bir LP EGR sistemi tarafından sağlanabilir. İkinci olarak, farklı motor devirlerinde ve yüklerinde LP ve HP EGR operasyonları arasında esnek bir şekilde geçiş yapmak, kompresör gaz akış oranını düzenleyerek kompresör haritasındaki yüksek verimlilik bölgesinde çalışmaya imkan sağlar [1].



Şekil 1.7 : Düşük basınçlı ve yüksek basınçlı EGR Sistemi kıyası [1].

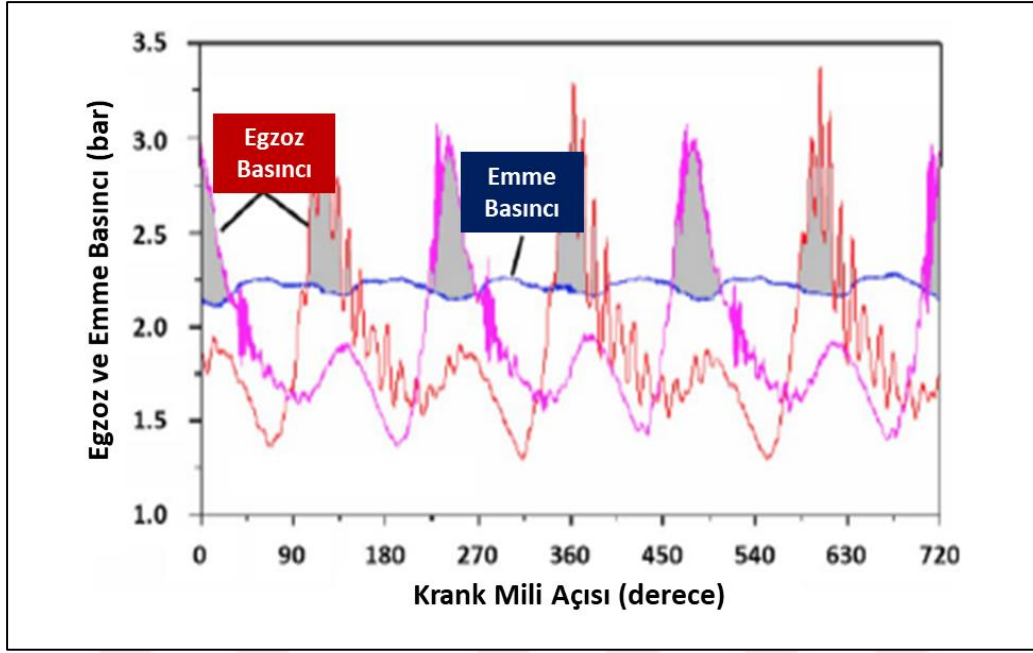
Geçici rejim manevrasında oluşan NO_x ve HC emisyonlarının değişimleri Şekil 1.7'de görülebilir. Dinamik manevra sırasında NO_x'daki artış, ilk düşük yük koşulundan kalan daha yüksek oksijen konsantrasyonu ile birlikte daha yüksek yakıt hava oranına ulaşmanın bir sonucudur. Emme manifoldundaki oksijen oranı düştükçe NO_x emisyonları da düşer. HC emisyonları, geçiş sırasında NO_x emisyonlarına kıyasla ters bir eğilim göstermektedir. Başlangıçta yakıt, EGR'deki daha yüksek oksijen oranı ile birlikte artırıldıkça, daha yüksek yanma sıcaklığına bağlı olarak HC emisyonlarında ufak bir düşüş olur. EGR gazının oksijen oranı azaldıkça, HC emisyonları sabit yük ve motor devri için daha yüksek değerlere ulaşır [12].



Şekil 1.8 : Dinamik manevrada emisyon değişim seviyeleri [12].

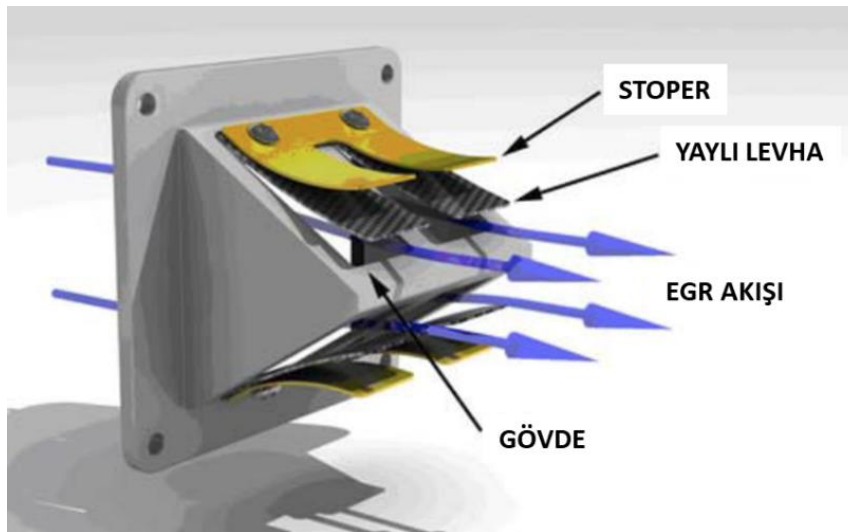
1.2.1.4 Reed Valfli EGR sistemi

Reed valf veya tek yönlü valf, yalnızca tek yönde akışa izin veren bir vanadır. Beklenen akışın aksi yönünde bir ters akışa yol açacak basınç farkı oluştuğunda, reed valfi kapanır. Egzoz gazı son derece darbeli olduğundan, reed valf kullanılmasındaki amaç, EGR akışını sağlayabilmek için gerekli olan ortalama basınç çok düşük olsa bile egzoz çevriminin tepesinde, egzoz gazlarının darbeli akışını kullanarak, her bir egzoz darbesi ile EGR akışını sağlayabilmektir. Şekil 1.9, bahsedilen darbeli akıştan faydalanarak EGR akışının nasıl sağlandığını göstermektedir [8].



Şekil 1.9 : Reed valf sisteminde egzoz gazı darbeleri ve doldurma basıncı [17].

EGR gazının emme manifolduna akması için egzoz manifold çıkış basıncının emme manifoldundaki basınçtan yüksek olması gerekir. Şekil 1.9’da gösterilen grafikte, egzoz gazı darbelerinin tepe basıncı, aşırı doldurma basıncının üzerindedir ve EGR akışına izin verir. Egzoz gazlarının tepe noktaları arasında EGR basıncı düşüktür ve geri akış riski vardır. Bu risk, bir Reed-valf kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Şekil 1.10, Reed valf olarak adlandırılan valfin neye benzediğini ve akış şemasını göstermektedir. Valfler gaz akışının basıncıyla açılır ve geri akış olması durumunda kapanarak geri akışı engeller [8].



Şekil 1.10 : EGR Sisteminde Kullanılan Reed Valf Örneği [18].

1.2.2 Hava yolu kontrol gereksinimi

Binek ve ticari dizel motorları için düzenlenen sıkı emisyon regülasyonları önemli teknolojik gelişmelere öncülük etmiştir. Yüksek basınçlı yakıt enjeksiyon sistemi ve EGR sistemi, partikül madde ve NO_x gibi zararlı emisyonların oluşumunu azaltmak için uygulanan teknolojik yöntemlerden biridir. Değişken geometrili aşırı doldurma sistemi, yakıt verimliliğini ve araç sürüş performansını iyileştirmek için dizel motorlarda yaygın olarak kullanılan bir başka önemli teknolojidir. Emisyon ve dizel motorun sürdürülebilirliği için geliştirilen teknolojiler sistem kontrolü düşünüldüğünde motor kontrol sisteminin karmaşıklığını artırmaktadır. Ek olarak, lineer olmayan kontrol ve model davranışları, kontrol sistemi tasarımında zorluklara neden olur [2].

Daha önceki bölümlerde motor dizaynı için çok çeşitli EGR sistemleri seçilebileceğinden bahsedilmiştir. EGR ile egzoz gazı, egzoz manifoldundan emme manifolduna yönlendirilir ve burada temiz hava ile karıştırılarak silindirlere beslenir. Hacimsel verimin düşmemesi için emme manifolduna gönderilen egzoz gazı soğutulur. EGR miktarını asıl belirleyen parametre, türbin girişindeki yani egzoz manifoldu çıkışındaki basınç ile emme manifoldu arasındaki basınç farkıdır. Bu basınç farkı aşırı doldurma sisteminin kontrol edilmesiyle belirlenir. Değişken geometrili aşırı doldurma sistemlerinde basınç farkı, turbo kanat konumlarının değiştirilmesi yoluyla geniş bir aralıkta kontrol edilebilir. Özellikle daha küçük dizel motorlarda, motor çalışma alanının büyük bir kısmında aşırı doldurma basıncı türbin girişindeki basınçtan daha düşüktür. Egzoz gazı kolay bir yönlendirme ile emme manifolduna akar. EGR miktarı, emme manifolduna aktarılan sistemde bir valf kullanılarak kontrol edilebilir. Bununla birlikte, ağır ticari araç motorları kompresör ve türbin karakteristiğine bağlı olarak binek araç motorlarına göre daha kısıtlı alanda EGR akıtılabilecek durumdadır [17].

EGR akışını kolaylaştırabilmek için, egzoz sisteminde statik basınç, her silindirde oluşan basınç darbeleri ile üst üste getirilmeye çalışılır. Bunun amacı, egzoz manifoldundaki basıncın emme manifoldundaki ortalama basınçtan büyük değerlerde tutup EGR akışını sağlamaktır. Ayrıca, ortalama egzoz manifoldu basıncının arttırılamadığı ve EGR akışının tersine basınç farkından dolayı mümkün olmadığı durumlarda EGR akışını sağlamak için reed valfler kullanılabilir. Yeterli basınç düşüşü ile EGR miktarının çalışma noktasına bağlı olarak ayarlanması, EGR

sistemindeki kontrol valfleri ile EGR akışının azaltılması yoluyla gerçekleştirilebilir [17].

Bu tez kapsamında yüksek basınçlı EGR sistemi kullanılmış olup, EGR akışını destekleyebilmek ve daha kontrollü bir aşırı doldurma basıncı elde edebilmek için değişken geometrili aşırı doldurma sistemi kullanılmıştır. Manifoldlar arası basınç farkı, istenen EGR oranını oluşturmak için yeterli olmadığında emme manifoldu öncesi gaz kelebeği kısılarak emme manifoldundaki basınç azaltılır veya değişken geometrili aşırı doldurma sisteminde türbin açıklığı değiştirilerek türbin girişindeki basınç arttırılabilir.



2. DİZEL MOTORLARDA EGZOZ GAZI EMİSYONLARI

Motorların oluşturdıkları egzoz gazları, hava kirliliğine yol açan en büyük problemlerden biridir. Son yıllarda otomotiv teknolojisinin gelişmesiyle beraber, araçların egzoz emisyonlarında büyük düşüşler sağlanmıştır. Ancak artan nüfus ve araç miktarıyla beraber, egzoz gazı emisyon limitlerinin güncellenmesini ve otomotiv dünyasının emisyonu düşürme yönünde önlemler almasını zorunlu kılmıştır.

20. yüzyılın başlarında, araç sayısının görece daha az olması sebebiyle büyük bir sorun olarak görülmemiştir. Araçların sayıları, karbon kökenli yakıt kullanan santraller ve genel olarak nüfusla birlikte arttıkça, hava kirliliği giderek büyüyen bir sorun haline gelmiştir. 21. yüzyıla gelindiğinde, hava kirliliği, büyük şehirlerde ve dünyadaki birçok büyük yerleşim alanında büyük bir sorun olarak kabul edilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde ve Avrupadaki sanayileşmiş ülkelerde araçların ürettiği egzoz emisyonlarını limitleyen yasalar çıkarıldı. Emisyon regülasyonlarıyla beraber, 1980'lerde ve 1990'larda otomobil motoru üretiminde egzoz emisyonları büyük bir dizayn ve tasarım problemi haline gelmiştir. Motorların ürettiği zararlı emisyonlar 1940'lardan beri %90'ın üzerinde azalmış olsa da, emisyonlar hala büyük bir çevre sorunu olmuştur.

İçten yanmalı motorlar tarafından üretilen dört ana emisyon hidrokarbonlar, karbon monoksit, azot oksit ve partikül maddelerdir. Hidrokarbonlar, yanmayan yakıt molekülleridir ve kısmen yanmış yakıtın daha küçük parçacıklardır. Karbon monoksit, tüm karbonu reaksiyona sokmak için yeterli oksijen bulunmadığında veya çok kısa motor çevrim süresi nedeniyle düşük hava-yakıt oranı sebebiyle oluşur. Azot oksit, yüksek yanma sıcaklıklarında, kararlı halde bulunan bazı azot moleküllerinin mono atomik nitrojene ayrışmasıyla ve daha sonra reaksiyona giren oksijenle birleştiğinde oluşur. Ayrıca, dizel motorlarda katı partiküller oluşur ve bu motorların egzozlarında siyah duman olarak görülebilir. Motorların egzozunda bulunan diğer emisyonlar arasında aldehitler, kükürt, kurşun ve fosfor bulunur [2].

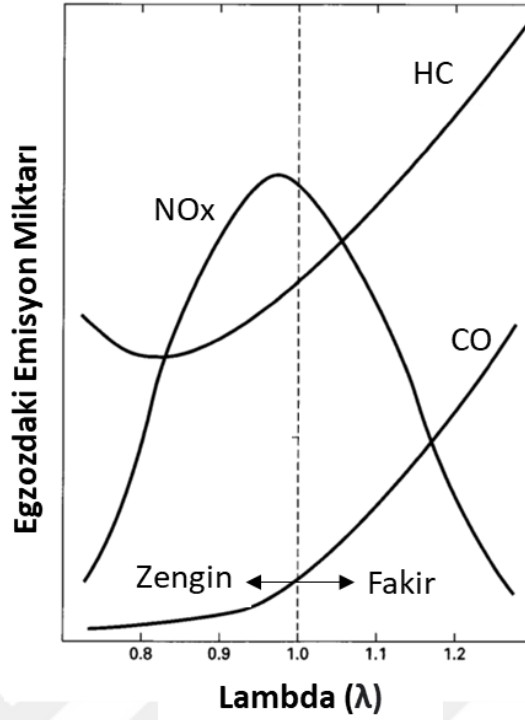
Dizel yanması sırasında çeşitli zehirli ve zehirli olmayan gazlar oluşur. Zehirli olmayan kısımlar su buharı ve karbondioksittir. Su buharı zararlı değildir ancak CO₂ emisyonunun çevreye olumsuz etkileri vardır. CO₂'nin küresel ısınmanın ana nedeni olduğu düşünülmektedir ve bu nedenle CO₂ emisyonlarının azaltılması gerekmektedir. Hidrokarbon kaynaklı yakıt kullanıldığında, CO₂ oluşumu motorun yakıt tüketimi ile direkt olarak ilişki içerisinde. Bu sebeple, CO₂'nin azaltılabilmesi için yakıt tüketiminin düşürülmesi gerekmektedir. Dizel motorlarda en zararlı iki emisyon türü azot oksitler ve partikül maddelerdir. HC ve CO emisyonları oldukça düşüktür ve DOC yardımıyla oldukça azaltılabilir [8].

2.1 Hidrokarbon (HC) Emisyonları

Dizel motorlar için HC emisyonu genellikle büyük bir problem değildir. Hidrokarbon emisyonları oksijen eksikliğinde veya yanma soğuk duvarlara yakın olduğunda meydana gelebilecek bir emisyon türüdür. HC oluşumuna yol açan bir diğer faktör de enjektör kaynaklıdır. Enjektör ucunda kalan hacimde enjeksiyonun sonunda küçük bir yakıt püskürtülmeden kalabilmektedir. Bu hacimde kalan yakıt yanma ısı ile buharlaşır ve düşük basınçla yanma odasına girer. Yanma odasına basınçsız bir şekilde sonradan dahil olan yakıt hava ile yavaş bir yanmaya neden olur ve bu nedenle bir miktar yakıt yanmadan HC emisyonu olarak atılabilir [19].

Hidrokarbon oluşumunda büyük rol oynayan parametreler incelenek olursa aşağıda sıralanmış olanlar büyük etkiye sahiptir.

- Tamamlanmamış yanma işlemi
- Stokiyometrik olmayan yanma
- Yanma sırasında oksijen yetersizliği
- Yanma odasında meydana gelen kaçaklar
- Yanma duvarlarında birikmiş kurumlar
- Yağ kaçakları



Şekil 2.1 : Yakıt hava oranına göre hidrokarbon emisyonu oluşumu [20].

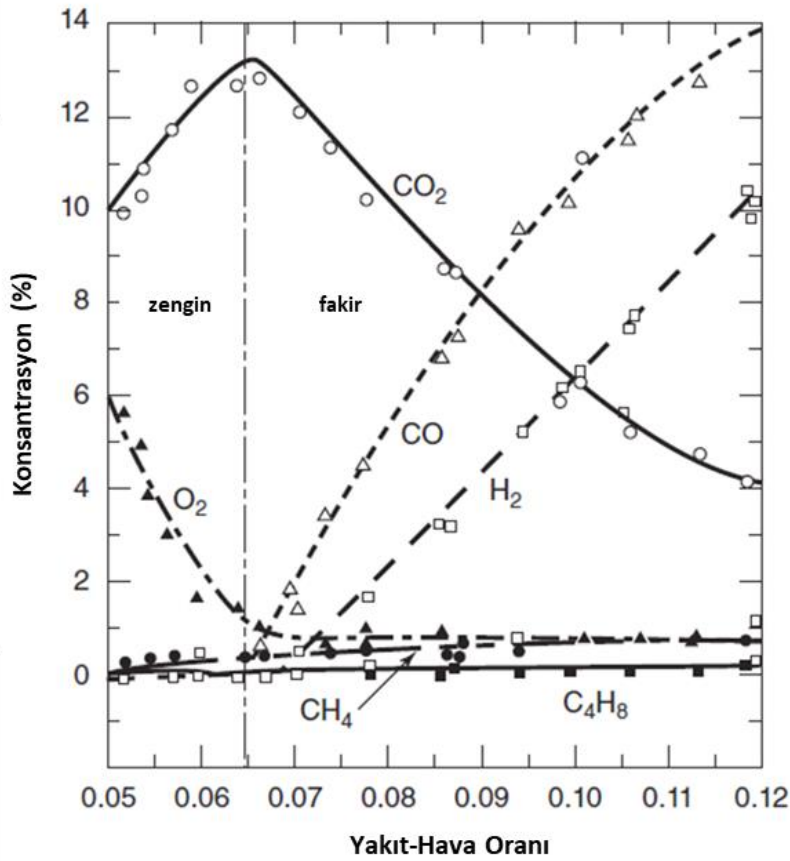
Dizel yanması genellikle havanın yakıta göre fazla olduğu hava-yakıt oranlarında gerçekleştiğinden, yakıt neredeyse tamamen yanmaktadır. Ancak gelişmiş sistemlerde, emisyon regülasyonları nedeniyle yüksek EGR oranlarına sahip modern dizel motorlar, benzinli motora kıyasla düşük oranda da olsa HC emisyonu oluşturabilmektedir. Dizel motorda HC ve CO emisyonlarını engellemek için motor sonrası DOC kullanılmaktadır.

2.2 Karbon Monoksit (CO) Emisyonları

Yakıttaki tüm karbonu karbondioksit'e dönüştürmek için yeterli oksijen olmadığından, zengin hava yakıt oranında çalışan motorların egzozunda karbon monoksit emisyonları görülür. Diğer bir CO kaynağı, yüksek yanma sıcaklıklarında CO₂'nin ayrışmasıdır. CO oluşumu ve engellenmesi, karbon kökenli yakıtın karbon monoksit'e parçalanması ve ardından karbon monoksitin karbon dioksit'e dönüşmesinden oluşan temel bir reaksiyon zinciridir. Yanma işlemde ısı transferinin çoğunluğu, aşağıda görülen denklemde gösterilen CO oksidasyonu sırasında gerçekleşir [21].



Karbon monoksit emisyonunu etkileyen en önemli motor parametresi hava fazlalık katsayısıdır. Şekil 2.2’de aşırı doldurulmalı bir motor için çeşitli yakıt hava oranına bağlı egzoz gazı emisyonlarının dağılımı gösterilmiştir. Stokiyometrik koşullara yakın durumlarda karbon monoksit emisyonu hava fazlalık katsayısına göre lineer davranmamaktadır. Bu koşullar altında, çok silindirli motorlarda, her bir silindirde eşit yakıt-hava oranının sağlanması kritik öneme sahiptir. Silindirlerin bir kısmı fakir karışımla, diğer kısmı da zengin karışımla çalışıyorsa, o zaman fakir karışımla çalışan silindir, zengin karışımla çalışan silindirlerden çok daha az CO üretir.



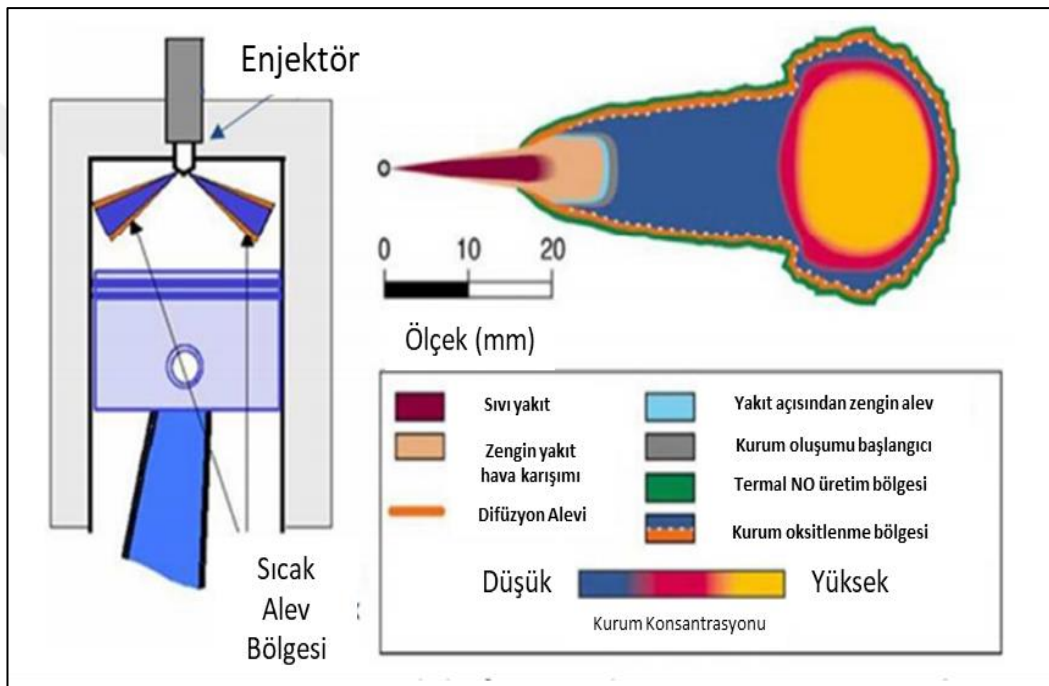
Şekil 2.2 : Yakıt-hava oranına göre karbon monoksit emisyonu oluşumu [20].

Dizel motorlar ise benzinli motorlara göre daha fakir karışımla çalıştığından ötürü, karbon monoksit oluşumu benzinli motorlara göre görece daha düşük seviyelerde kalmaktadır.

2.3 Partikül Madde (PM)

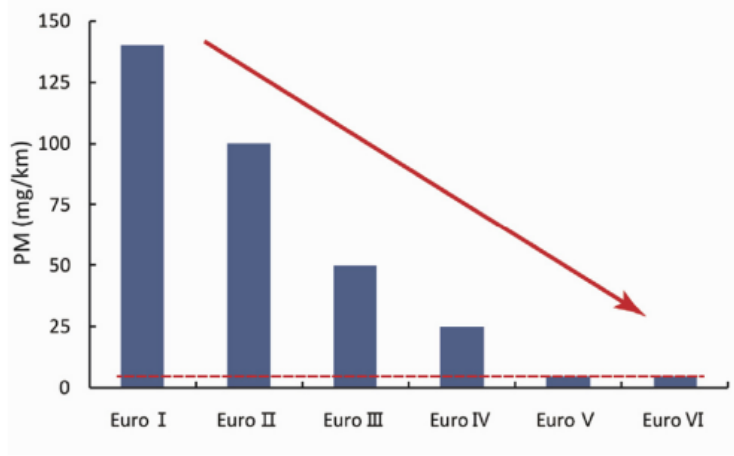
Partiküller, dizel motorlarda performansı limitleyebileceğinden, dizel motorlar için kritik bir emisyondur. Buji ateşlemeli motorlardaki partikül emisyonları görece çok

daha düşüktür ve yüksek yakıt hava oranında doğrudan yakıt enjeksiyonuyla oluşur. Egzoz gazlarında yüksek miktarda partikül madde bulunmasında durumunda gözle görülür şekilde duman veya siyah kurum olarak kendini gösterir. Dizel motorlarda yanma heterojendir ve difüzyon alevinin yakıt açısından zengin bölgesinde yakıtın tam yanmama durumu nedeniyle partikül madde oluşur. Dizel motorun yanma süreci genel olarak fakir olsa da, hem önceden karıştırılmış ön yanmada hem de hava ile yakıtın karıştığı kontrollü yanma fazlarında yakıt açısından zengin yanma bölgeleri oluşur [21]. Şekil 2.3'te heterojen yanmada yakıt damlacığındaki kurum yoğunluğu görülebilir.



Şekil 2.3 : Yakıt Damlasında Kurum Emisyonu Konsantrasyonu [20].

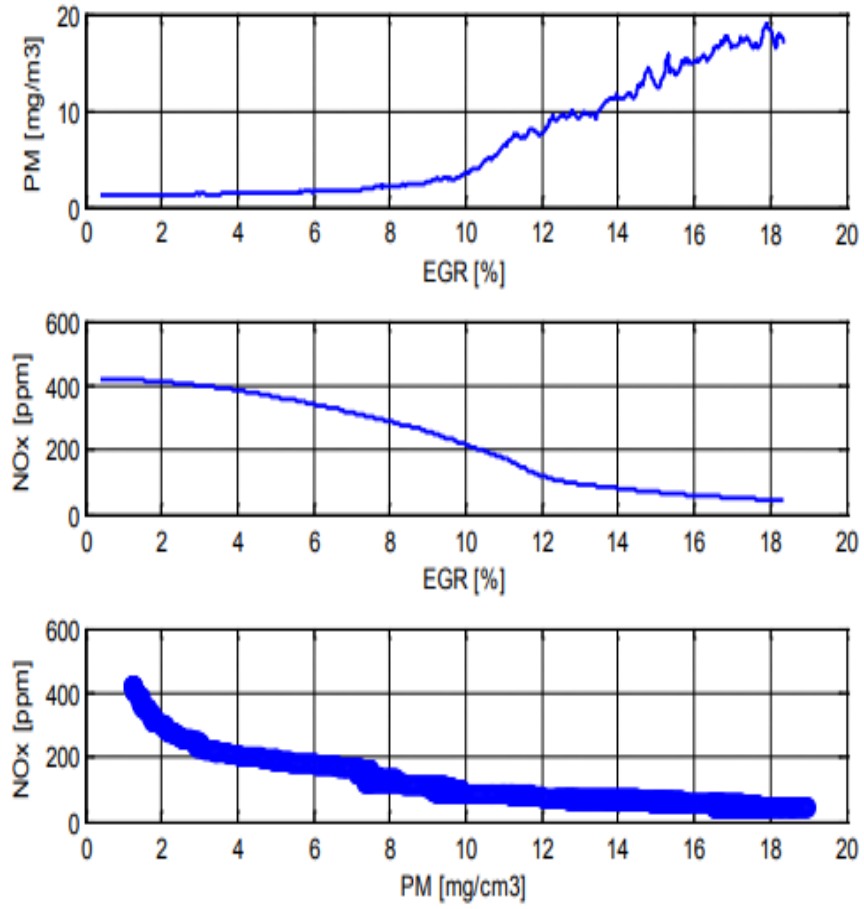
Dizel motorlarının egzozu, yanma sırasında silindir içindeki yakıt damlacığının iç tarafında zengin karışım kalan bölgelerde oluşan katı karbon kurum parçacıkları içerir. Kurum emisyonu, yoğunluğuna bağlı olarak egzoz çıkışında gözle görülebilir. Dizel motorlarda gaza aniden tam olarak basılan WOT (Wide Open Throttle) manevrasında partikül emisyonları çok yoğun bir şekilde oluşmaktadır. Bu durumda maksimum gücü alabilmek adını maksimum miktarda yakıt enjekte edilir ve bu durum zengin bir karışıma ve yüksek yakıt tüketimine yol açar [20].



Şekil 2.4 : Kurum emisyon limitlerinin emisyon seviyesine göre değişimi [20].

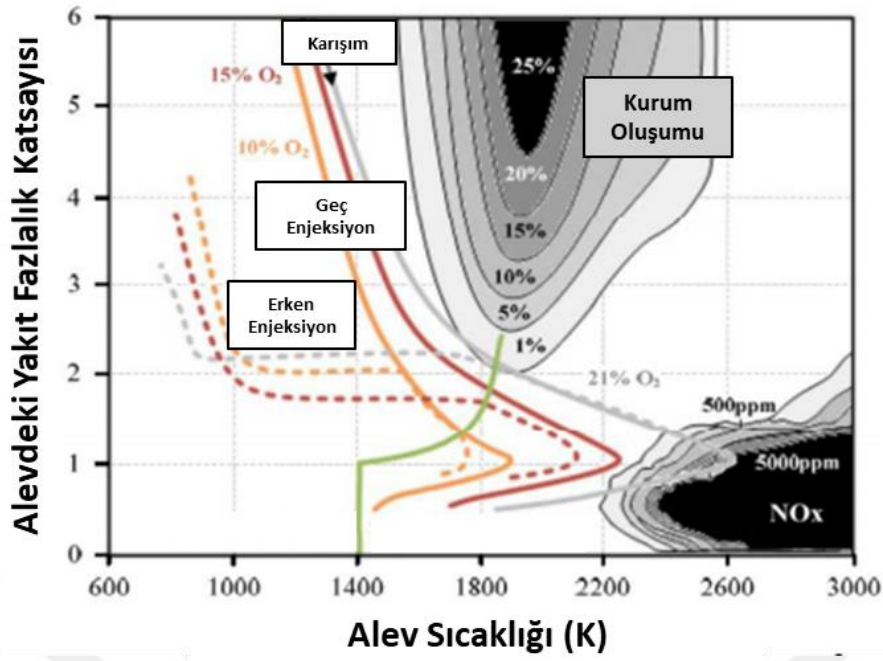
Partikül oluşumu, motor tasarımı ve çalışma koşullarının kontrolü ile azaltılabilir, ancak çoğu zaman bu durum başka olumsuz sonuçlar doğuracaktır. Yanma odası tasarımı ve enjeksiyon zamanlaması kontrol edilerek yanma süresi uzatılırsa egzozdaki partikül miktarları azaltılabilir. Bu sayede yanma sonucu üretilen kurum partiküllerinin oksijenle reaksiyona girerek yanması ve CO₂'ye dönüşmesi için daha fazla zaman olur. Bununla birlikte, daha uzun bir yanma süresi, yüksek bir silindir sıcaklığı ve daha fazla NO_x üretilmesi anlamına gelir. EGR sistemi ile NO_x emisyonlarını düşürülür ancak bu durumda kurum HC emisyonları artış gösterir. Daha yüksek enjeksiyon basıncı, HC ve partikül emisyonlarını azaltan ancak silindir sıcaklığını ve NO_x emisyonlarını artıran daha ince bir damlacık boyutu sağlar. Motor kontrol sistemleri enjeksiyon zamanlamasını, enjeksiyon basıncını, enjeksiyon veya valf zamanlamasını kontrol ederek NO_x, HC, CO ve partikül emisyonlarını en aza indirecek şekilde kalibre edilir. Ancak emisyonlar arasında her zaman bir denge mekanizması vardır. Çoğu motorda, egzoz partikül miktarları yalnızca motor tasarımı ve kontrolü ile güncel emisyon seviyelerine göre limiti aşmayan seviyelere indirilemez [20].

EGR sistemi ile beraber silindire giren temiz hava seyreltir. EGR akışıyla beraber ortalama yanma sıcaklığını düşürülür, böylece emisyonlar arasında bir denge meydana gelir. Daha düşük PM emisyonları, yanma odasında yüksek sıcaklık ve oksijene ihtiyaç duyar, ancak bu koşullar da NO_x emisyon oluşumunu arttıracaktır. Şekil 2.5'ta dizel motorlardaki kurum ve NO_x emisyonları arasındaki ilişki görülebilir [22].



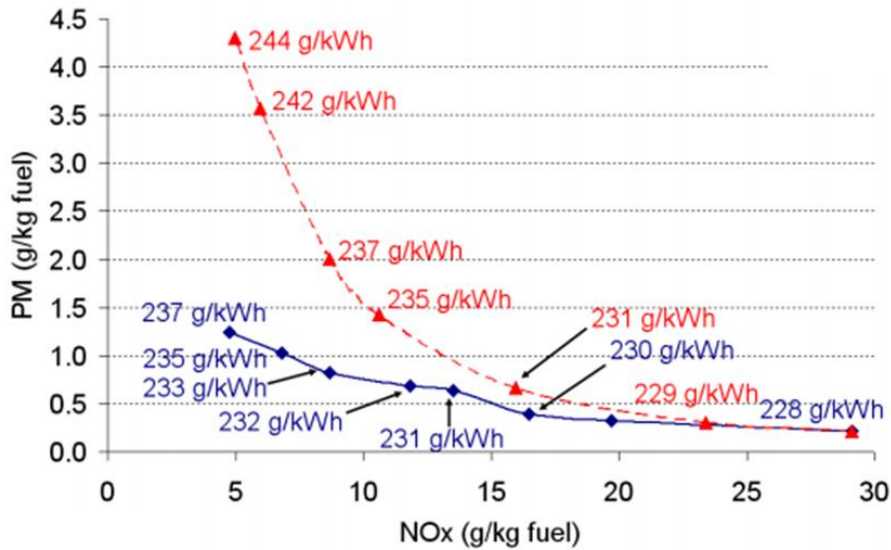
Şekil 2.5 : Dizel Motorda Kurum ve NOx Emisyonu Arasındaki İlişki [22].

Dizel yanmasında NOx ve kurum oluşumu büyük ölçüde hava yakıt oranına ve yanma sıcaklığına bağlıdır. Şekil 2.6, yakıtça zengin karışımlarda yüksek kurum oluşum bölgelerini ve yüksek sıcaklıkta yüksek NOx emisyonuna sahip bölgeleri, yakıt hava oranı ve yanma sıcaklığına bağlı olarak göstermektedir. Koyu olarak görülen yerler kurum yoğunluğunu göstermektedir. Yüzdelik miktar ise kurumda oluşan yakıt karbon yüzdesini göstermektedir. Enjeksiyon stratejisi ve zamanlamasına göre kurum ve azot oksit emisyonları arasındaki ilişki görülebilir. Yanma sıcaklıkları arttıkça azot oksit emisyonları artış eğilimindedir. Yakıtın havaya oranla fazla olduğu durumlarda ise kurum emisyonları artış yönündedir.



Şekil 2.6 : Yakıt-Hava Oranına ve Alev Sıcaklığına Bağlı Kurum ve NOx [23].

PM emisyonu ve NOx arasındaki denge, aynı zamanda bSFC için de geçerlidir. Yanma veriminin kötüleştirilerek NOx emisyonlarının azaltılması sonucunda kurum emisyonları artış eğilimindedir. NOx emisyonunu azaltan parametreler yanmayı kötü yönde etkilediği için, birim yakıt başına alınan güç düşecek, böylece NOx emisyonu azaldıkça kurum emisyonu ve SFC artacaktır. Şekil 2.7’de NOx ve kurum emisyonuna karşın SFC değişimi görülebilir.



Şekil 2.7 : Dizel Motorda Kurum ve NOx Emisyonu Arasındaki İlişki [24].

2.4 Azot Oksit Emisyonları (NO_x)

Dizel motorlar benzinli motorlarla kıyaslandığında, dizel motorlar daha yüksek miktarda NO_x, benzinli motora göre daha fazla partikül madde (PM) ve çok daha az CO ve HC emisyonu oluşturur. Hava-yakıt karışımına bağlı olarak, yanma mekanizmasının iyileştirilmesiyle beraber kurum azaltabilir, ancak bu davranış genellikle NO_x'da artışa neden olur. Dizel motorda NO_x ve PM arasında trade-off olarak ifade edilen temel bir denge mekanizması vardır. Benzinli motordan kaynaklanan NO_x emisyonları, üç yollu bir katalizör ile azaltılabilir. Ancak şu anda NO_x'i dizel motordan temizlemek için herhangi bir aftertreatment (egzoz gazı arındırma) yöntemi kullanmak benzinli motorlara göre daha maliyetlidir. Düşük yakıt tüketimini elde etmek ve ayrıca motor çıkış NO_x ve kurumunu azaltmak, dizel motor yanma mekanizması ve hava yolu sisteminin tasarım parametrelerinde seçilecek donanımlar için önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Dizel yanmasında azot oksit emisyonları büyük ölçüde, 1.0-1.2'lik bir yerel hava-yakıt oranıyla önceden karıştırılmış fakir yanma aşamasında oluşmaktadır ve kurumun esas olarak yakıt damlacığının difüzyon yanma aşamasında ve zengin karışıma sahip olan 0.5 – 0.6'dan daha düşük bir yerel hava-yakıt oranında yetersiz hava ile oluşmaktadır. Dizel motor yanmasında hava ve yakıt arasındaki heterojen karışım, dizel motordaki kurum emisyonunun temel nedenidir. Dizel motor tasarımında önemli olan, yanma işlemini PM – NO_x dengesini her iki taraf içinde iyi yöne götürecek optimum bir motor hava ve yakıt yolu kontrolü sağlamaktır [1].

Yanma işlemi ile beraber oluşan azot oksit emisyonları, atmosferde su buharı ve güneş ışınları ile reaksiyona girerek asit yağmurunun bir bileşeni olan nitrik asit ve hava kirliliğine neden olan ozon (O₃) oluşturur. Azot oksit emisyonları kritik solunum sistemi rahatsızlıklarına ve çevreye çok zararlı olan asit yağmurlarına neden olabilmektedir. Buna ek olarak, ormanlara, akarsulara ve tarım ürünlerine de zarar verir. İklimsel olarak mevcut rüzgarlar tarafından geniş bir bölgeye taşınırsa, azot oksit emisyonları bölgesel hava kalitesi sorunları yaratabilir [21].

Hava-yakıt oranı, enjeksiyon zamanlaması, motor devri ve aşırı doldurma basıncı gibi motor çalışma koşullarının, hem benzin hem de dizel motorlardaki azot oksit emisyonu üzerinde etkisi vardır. NO_x'u oluşturan kimyasal reaksiyonlar büyük ölçüde yanma

sıcaklığına bağlıdır, bu nedenle motorun ilk çalıştırma ve ısınma sırasında yanma sıcaklıklarının düşük olmasına bağlı olarak NO_x emisyonları göreceli olarak düşüktür. Ek olarak azot oksit emisyonları miktar olarak motor yüküne de bağlı değişkenlik gösterir. Nitrojen molekülü (N₂) 945 kJ/mol'lük bir bağ ayrışma enerjisi ile üçlü bir bağa sahiptir ve oksijen molekülü (O₂) 498 kJ/mol'lük bir çift bağ ayrışma enerjisine sahiptir, bu nedenle N₂ bağlarını koparmak için göreceli olarak yüksek bir yanma sıcaklığı gereklidir [21].

NO_x üretimini modellemek için geliştirilmiş üç ana ayrıntılı kimyasal mekanizma vardır. Bunlar termal veya Zeldovich mekanizması, hızlı veya Fenimore mekanizması ve yakıtla bağlı nitrojenin yanmasıdır. İçten yanmalı motorlar için en önemlisi, alev cephesinin arkasındaki yüksek sıcaklıkta yanmış gazlarda NO'nun oluştuğu Zeldovich mekanizmasıdır. Fenimore mekanizması, nispeten düşük alana sahip olan yanma alevi cephesinde meydana gelir. Yüksek sıcaklıkta yanmış gazların hacmi, alev cephesinin anlık hacminden çok daha büyük olduğundan, Fenimore mekanizması ile oluşan NO miktarı, termal veya Zeldovich mekanizmasından oluşan azot oksit emisyonuna kıyasla nispeten küçüktür [21].

NO_x oluşumu, yüksek yanma sıcaklıklarında ve oksijen yoğunluğun yüksek olduğu yanma bölgelerinde meydana gelir. İçten yanmalı motorlarda NO_x oluşumu için en önemli mekanizma termal NO_x oluşumudur. Termal olarak azot oksit emisyonu oluşum mekanizması Zeldovich tarafından tanımlanmıştır. Termal olarak NO_x oluşumu üç kimyasal reaksiyondan meydana gelir [19].



Dizel motorda yanma reaksiyon sıcaklığı ne kadar yüksekse, daha fazla diatomik nitrojen (N_x), mono atomik nitrojene (N) ayrışacak ve daha fazla azot oksit emisyonu oluşacaktır. Dolayısıyla düşük yanma sıcaklıklarında daha az azot oksit emisyonu oluşur [20].

NO_x oluşumunu etkileyen diğer parametreler incelenecek olursa [21];

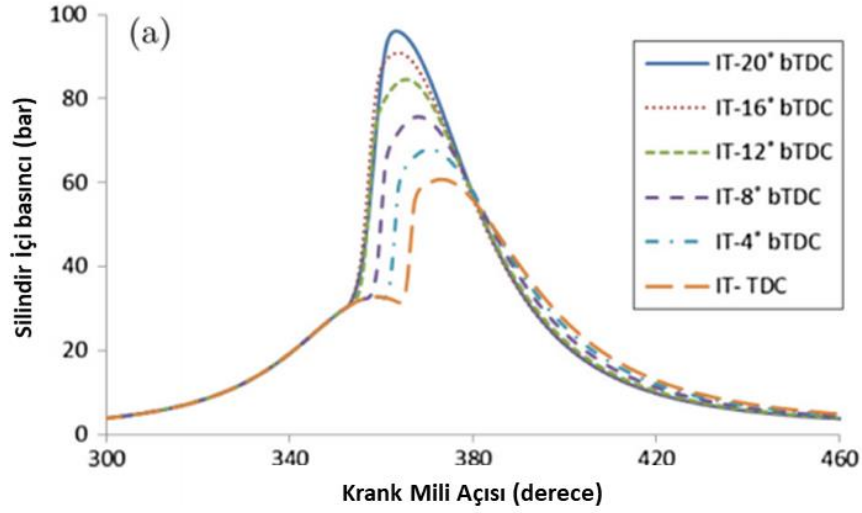
- Silindir ısı kayıplarının azalması durumuna bağlı olarak artan silindir duvar sıcaklığı, yanma sıcaklıklarını artırarak azot oksit emisyonlarının oluşumunu artırır.
- Enjeksiyon zamanlamasına bağlı olarak azot oksit emisyonu oluşumu değişecektir. Enjeksiyon zamanlamasının erkene alınmasıyla yanma sıcaklıkları arttığı için NO_x miktarı artar.
- Motor devrinin değişmesiyle ısı kaybı ve yanma için mevcut süre değişecektir. Motor devri arttıkça ısı kaybı azalarak yanma sıcaklığında bir artışa neden olur. Ek olarak motor hızının artmasıyla yanma için ayrılan süre azalacağından, yanma sıcaklığı düşecektir.
- Aşırı doldurma sistemiyle beraber emme manifoldu basıncının ve dolayısıyla IMEP'in (İndike ortalama efektif basınç) artması azot oksit emisyonlarını arttırıcı yönde etki yapacaktır. Ancak aşırı doldurma sisteminde EGR akışıyla beraber NO_x emisyonlarında düşüş elde edilebilmektedir [21].

2.4.1 Azot oksit oluşumunu etkileyen parametreler

Dizel motor yanmasına etki eden parameterler, emisyon oluşumunda da belirleyici olmaktadır. Yanma odasının tasarımından, kullanılan hava yolu sistemlerine kadar geniş bir alanda dizel motor yanması optimize edilerek emisyon ve yakıt tüketimi dengesi kurulmaya çalışılır. Dizel motorlarda azot oksit emisyonu oluşumunu etkileyen parametreler, enjeksiyon zamanlaması, yakıt basıncı, egzoz gazlarının yanma odasına yönlendirilmesi (EGR) vb. yöntemler olarak sayılabilir.

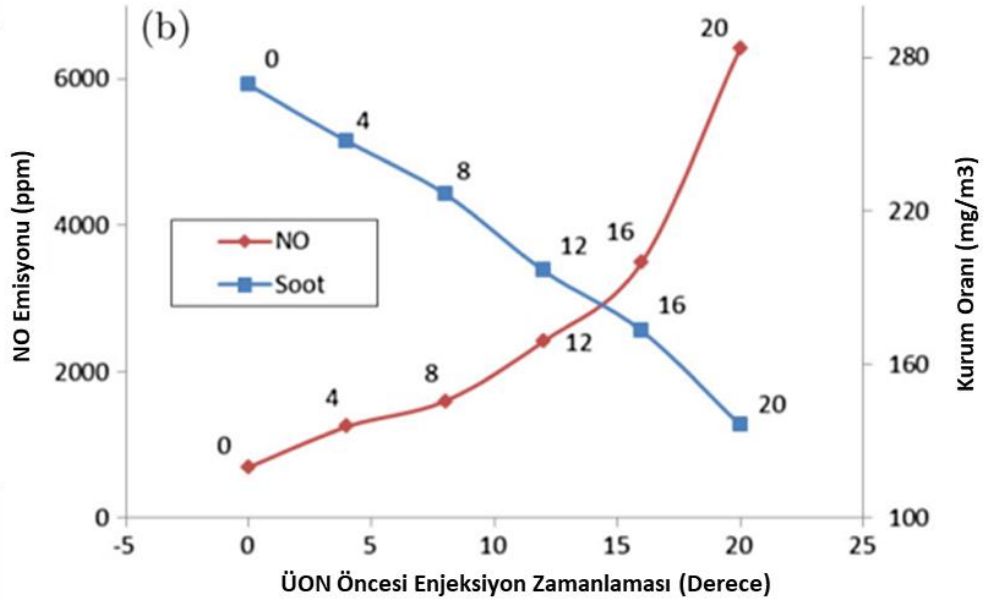
2.4.1.1 Enjeksiyon zamanlaması

Enjeksiyon zamanlaması, yanma mekanizmasında ve emisyon oluşumunda kritik bir role sahiptir. Ateşleme veya enjeksiyon zamanlamasını geciktirerek, azot oksit emisyonlarının önemli ölçüde azaltılması mümkündür. Enjeksiyon zamanlamasının erkene alınmasıyla, ateşleme ve yanmanın çok daha erken meydana gelmesi ve pistonun üst ölü noktaya (ÜON) yaklaşmasıyla beraber tepe basıncın erken oluşmasına yol açar. Dolayısıyla yanma sıcaklıklarında hızlı bir artış meydana gelir ve bununla beraber Zeldovich mekanizması olarak da bilinen termal mekanizma yoluyla NO_x emisyonlarında artışa sebep olur [25].



Şekil 2.8 : Enjeksiyon Zamanlamasına göre silindir içi basıncının değişimi [26].

Şekil 2.8’de görüleceği üzere, püskürtmeyi sıkıştırma aşamasında üst ölü noktadan daha erken konumda yaparak enjeksiyon zamanlamasının erkene alınmasıyla silindir içi basınçlarda artış meydana gelir. Bununla beraber daha önce bahsedildiği üzere yanma sıcaklıklarında hızlı bir artış meydana gelir ve Şekil 2.9’da görüleceği üzere azot oksit emisyonlarında artışa sebep olur.



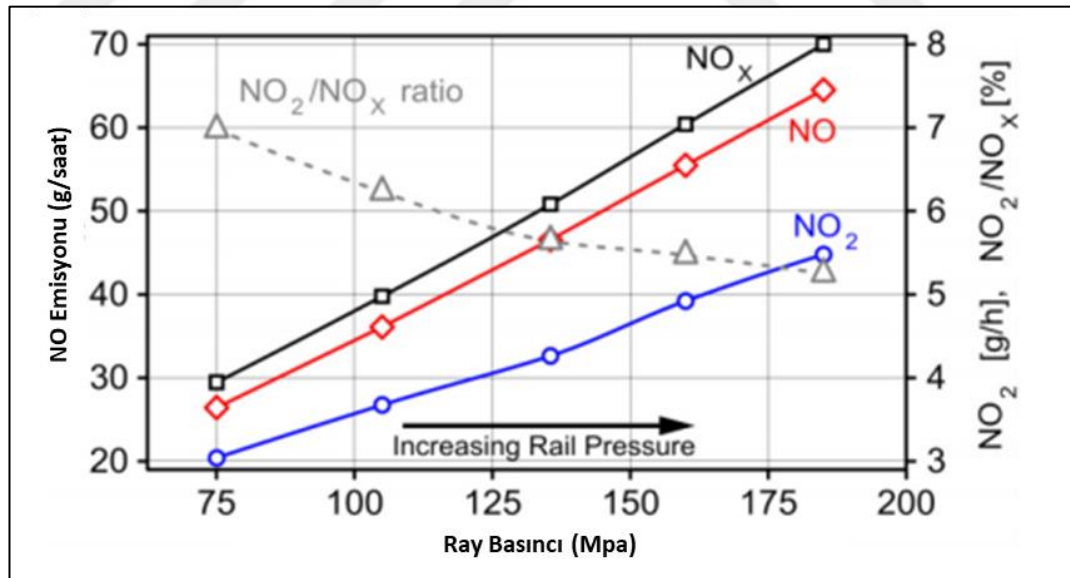
Şekil 2.9 : Enjeksiyon zamanlamasına göre kurum ve NOx değişimi [26].

2.4.1.2 Hava yakıt oranı

Dizel yanmasında hava-yakıt oranı karışımındaki değişiklik yanma sıcaklıklarını etkiler. Daha önceden bahsedildiği üzere, yanma sıcaklığının değişmesiyle beraber, azot oksit oluşumu da etkilenecektir. Bu nedenle karışımındaki hava miktarının azaldığı durumda hava yakıt oranı düşecek, yanma sıcaklıkları artacak ve azot oksit emisyonlarında artışa neden olacaktır. Daha düşük hava-yakıt oranlarında göreceli olarak yüksek olan yakıt emme havasının sıcaklıklarını düşürme eğilimine sahiptir, bu da yanma bölgesindeki yerel tepe sıcaklıklarında bir düşüşe neden olur. Dolayısıyla NOX emisyonları düşecektir [25].

2.4.1.3 Püskürtme basıncı

Enjeksiyon zamanlaması, yanmanın başlangıcını doğrudan etkilerken, ray basıncı yanma oranını etkiler. Ray basıncının artırılması, enjeksiyon zamanının avansa alınmasıyla aynı etkiye sahiptir. Hem daha erken enjeksiyon yapmak hem de daha yüksek ray basıncı ile yakıt püskürtmek, daha erken bir yanma aşamasına ve dolayısıyla yanma işlemi sırasında daha yüksek ısı geçişine neden olacağından, azot-oksit emisyonları önemli ölçüde artar [27].

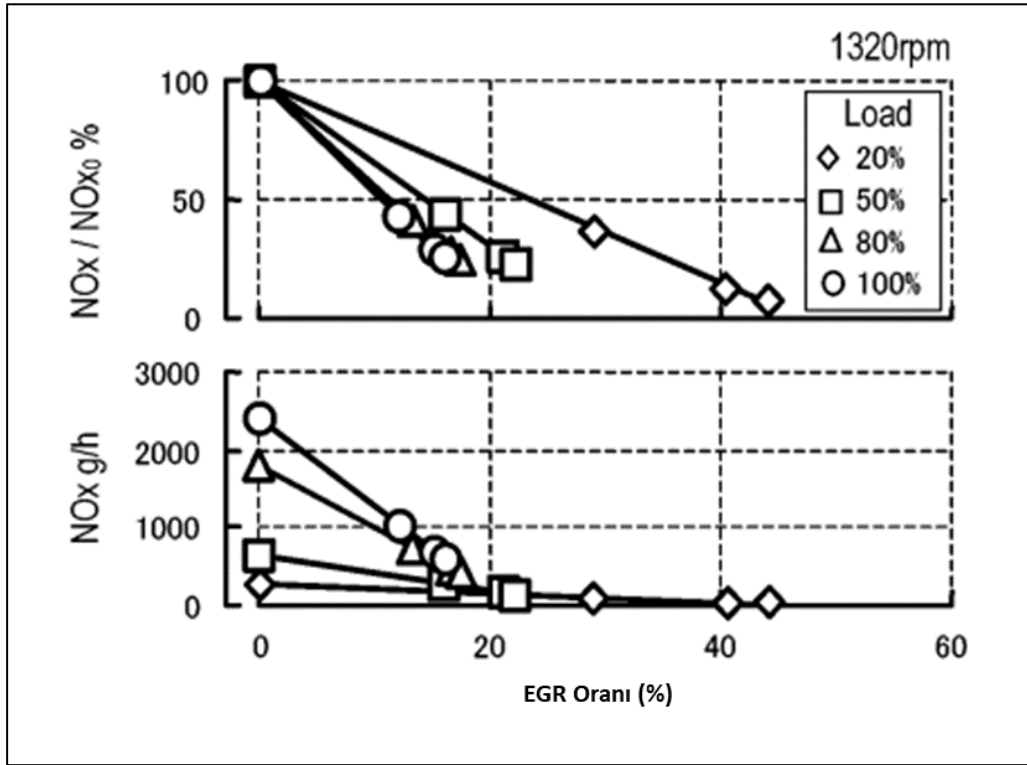


Şekil 2.10 : Ray Basıncına Bağlı Olarak Azot Oksit Emisyonu Değişimi [27].

2.4.1.4 Egzoz gazı resirkülasyonu

Daha önceden belirtildiği üzere, EGR diğer NOx kontrol sistemleriyle birlikte NOx emisyonlarının kontrolünde ve azaltılmasında yaygın olarak kullanılan bir emisyon

kontrol yöntemidir. EGR sisteminde egzoz gazlarının bir kısmı taze aşırı doldurma havasıyla beraber yanma odasına yeniden alınır. Azot oksit emisyonunun oluşmasında yanma sıcaklıklarının çok önemli olduğu ve termal mekanizmalara bağlı olduğundan bahsedilmiştir. EGR ile azot oksit emisyonunun azaltılmasındaki asıl işlev ise, yanma odasındaki karışımın yanma sıcaklıkları düşürmektir. Atık gazların yanma odasına alınmasıyla yanma sonu sıcaklıkları düşmektedir. Ek olarak, karışımın oksijen oranı düşürülmektedir. Silindir içine alınan atık gazların, yanma odasındaki gazların özgül ısı kapasitesini yükseltmesi sebebiyle, gaz sıcaklıkları göreceli olarak daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bununla beraber azot oksit emisyonlarında azalma meydana gelmektedir.



Şekil 2.11 : EGR Oranına Bağlı Olarak Azot Oksit Emisyonu Değişimi [26].

2.5 Emisyon Regülasyonları

Günümüzde ulaşım, taşıma ve makina kullanımına bağlı olarak içten yanmalı motorlara olan talep hızla artmış ve kullanımları yaygınlaşmıştır. İçten yanmalı motorların yoğun kullanımına bağlı olarak, çevreye verdikleri gazların zararlı etkileri tartışma konusu olmuştur. Fosil yakıtlı motorların çevreye verdikleri zararları azaltmaları yönünde teşvik etmek ve bunları bir standart haline getirebilmek adına

emisy on reg ü lasyonları oluşturulmuş ve ü reticilerden bu standartlara ba ğlı kalarak araç ü retmeleri istenmiştir.

Avrupa ilk olarak 1988'de a ğır ticari vasıtalar da emisy on reg ü lasyonlarını y ü r ü r l ü ğ e almıştır. “Euro” olarak adlandırılan reg ü lasyon, her birkaç yılda bir uygulan an sıkı standartlarla 1992'de oluşturulmuştur. A ğır hizmet tipi Euro standartları Roma rakamları kullanılarak numaralandırılmaktadır (Euro I, II... .V) [28].

A ğır ticari motorlarda testler araç seviyesinde de ğ il, test odalarında dinamometre vasıtasıyla motorlarda ö lç ü m cihazlarıyla beraber gerç ekleştirilir ve sınır de ğ erler, hafif-ticari araç ların aksine kilovat saat başına gram (g/kWh) olarak ifade edilir.

G ün ü m ü zde a ğır ticari taşıtlar iç in en g ü ncel emisy on seviyesi Euro 6'dır. Bir ö nceki emisy on seviyesi olan EU5'e g ö re yeni bir geç ici rejim manevralarını iç eren ve so ğ uk/sıcak b ö l ü m olmak ü zere iki fazdan oluşan WHTC (World Harmonized Transient Cycle) iç ermektedir. Ayrıca EU5 emisy on seviyesinde test edilme zorunlulu ğ u bulunmayan, gerç ek yol koşullarında araç testi koşmayı iç eren PEMS (Portable Emission Measurement System) testi eklenmiştir. Bu tez ç alışması kapsamında EU6 emisy on seviyesine ait WHTC ve PEMS testlerinden yararlanılmıştır.

Ç izelge 2.1 : Emisy on Seviyelerine G ö re Sabit Rejimde Emisy on Limitleri [29].

Emisy on Seviyesi	CO	HC	NOx	PM
Euro 1	4.5	1.1	8.0	0.36
Euro 2	4.0	1.1	7.0	0.25
Euro 3	2.1	0.66	5.0	0.07
Euro 4	1.5	0.46	3.5	0.02
Euro 5	1.5	0.46	2.0	0.02
Euro 6	1.5	0.13	0.40	0.01

Ç izelge 2.1'de ç eşitli emisy on seviyelerine g ö re statik emisy on testlerindeki emisy on limitleri g ö r ü lebilir. Limitler g/kwh birimindedir.

Ç izelge 2.2 : Emisy on Seviyelerine G ö re Geç ici Rejimde Emisy on Limitleri [29].

Emisy on Seviyesi	CO	HC	NOx	PM
Euro 3	3.0	0.78	5.0	0.16
Euro 4	4.0	0.55	3.5	0.03
Euro 5	4.0	0.55	2.0	0.03
Euro 6	4.0	0.16	0.46	0.01

Çizelge 2.2’de geçici rejim manevralarına sahip dinamik testlerdeki emisyon limitleri görülebilir. Üretilcek olan araçlar güncel emisyon seviyesindeki limitleri aşmadan regülatif testleri başarıyla tamamlamalıdır.

Ağır ticari dizel motorlarının emisyon regülasyonlarını sağladığını belgeleyebilmek için, motorlar bir dinamometrede test edilir ve emisyonlar g/kWh olarak raporlanır. WHSC (World Harmonized Stationary Cycle), motor hızına ve motor yüküne bağlı olarak on üç modun üzerindeki emisyonların ağırlıklı toplamına dayanan bir emisyon çevrimidir. Ölçümler belirlenen motor devir ve yüklerinde sabit durumlarda yapılır. Bu çevrim, Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avustralya'daki gerçek sürüş koşullarının sabit rejime indirgenmesiyle elde edilmiştir. Test öncesi motor tam yük konumuna göre yarım yükte koşullandırılmaktadır. WHTC testi, orijinal olarak UNECE Kirlilik ve Enerji Çalışma Grubu tarafından geliştirilen, gerçek sürüş koşullarını yansıtmayı hedefleyerek motorun yüksüz koşulları da dahil olmak üzere farklı sürüş koşullarından oluşan 1800 saniyelik iki fazdan oluşan geçici rejime dayalı bir motor testidir. WHSC testinden farklı olarak hem geçici rejim manevralarından oluşur hem de motor testin ilk bölümüne ısıtılmadan soğuk koşullarda başlar. Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Avustralya'da bulunan çeşitli kullanım koşullarına göre dünya çapındaki gerçek ağır ticari araç kullanımı sürüşüne dayanmaktadır [30].

3. MOTOR DENEYİ VERİ ÖLÇÜMÜ

Yapılan çalışmanın anlamlı olduğunu anlamak için, deney motorundan yeterince veri ve ölçüm alınması gerekmektedir. Bu ölçümlerin de doğru bir şekilde yapılması için kullanılan sensörlerin belirli bir aralık ve hassasiyetle veri okuması gerekmektedir. Hassasiyetin kabul edilebilir bir aralıkta olduğuna emin olunduktan sonra yapılan çalışmanın sonuçlarının da güven verici olması sağlanır. Motorun sağlıklı çalıştığından emin olmak ve ek olarak bu tez kapsamında yapılan çalışmanın sonuçlarını iyi bir şekilde anlayabilmek için yeterince sensör ve ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlarla ölçülen veriler aşağıda gösterilmiştir.

- Motor devri
- Motor momenti ve güç değeri
- Özgül yakıt tüketimi
- Havanın kütleli debisi
- Yakıtın kütleli debisi
- Azot oksit emisyonları ölçümü
- Kurum emisyon ölçümü
- Hava-yakıt karışım oranı
- Egzoz manifoldundaki sıcaklık ve basınç değerleri
- Motor soğutma suyu sıcaklığı
- Motor yağı sıcaklığı
- Hava emiş tarafı ve egzoz tarafındaki kritik noktalarda sıcaklık ve basınç değerleri
- Emme ve Egzoz manifoldundaki anlık basınç değerleri

Deney sonucunda elde edilmiş veriler yorumlanmadan önce dikkatlice incelenmelidir. Motora enstrümanite edilmiş sensörler ile motorun kendine ait sensörlerdeki değerlerin tutarlı olup olmadığı kontrol edilmelidir. Deneyde dinamik emisyon kontrolü açık ve kapalı olmak üzere iki farklı adım ve emisyon testleri yapılmıştır. Bu testlerde motorun belirli zamanlarda aynı hedef moment ve hız değerlerine ulaştığı anlardaki verilerin farklı sensörler yardımıyla tutarlı ölçüm yapıp yapmadığı kontrol

edilmiştir. Ek olarak, testler farklı zamanlarda tekrarlanarak testlerin kendi arasındaki sapmalar da kontrol edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında test edilen deney motoru, 12,7 litre hacminde Euro 6 emisyon seviyesinde 6 silindirli bir motordur. Motor, değişken geometrili aşırı doldurma sistemi ve EGR sistemine sahiptir. Deneyler, Ford Otosan'ın Gölçük fabrikasındaki motor deney tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Motor dinamometresi 500 kW maksimum ölçüm kapasitesine sahiptir.

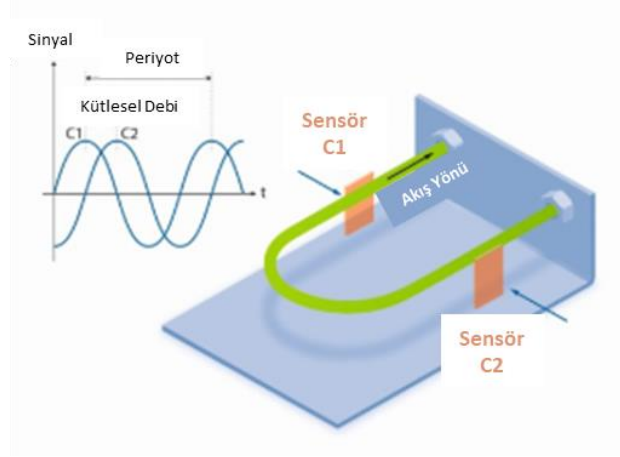
3.1 Yakıt Ölçümü

Deneyler sırasında motorun tükettiği yakıt miktarının hassas seviyede ölçülebilmesi için AVL tarafından üretilmiş 735S modeli cihaz kullanılmıştır. Bu cihaz aynı zamanda yakıt giriş sıcaklık ve basınç kontrolünü de sağlamaktadır. Yakıt giriş sıcaklığı 10-80 °C arasında kontrol edilebilmektedir. Yakıt cihazındaki debi ölçüm aralığı 0-125 kg/saat olup, cihazın ölçüm hassasiyeti %0,12 mertebesindedir.



Şekil 3.1 : 735S kütleli yakıt ölçüm cihazı.

Yakıt cihazı, debi miktarını coriolis prensibini kullanarak, U tipi borunun titreşimi sebebiyle oluşturduğu frekansın kullanılmasıyla ölçer. Cihazın sahip olduğu C1 ve C2 sensöründeki katsayıların ve yakıtın özgül kütlesi kullanılarak yakıt debisi hesaplanır [31].

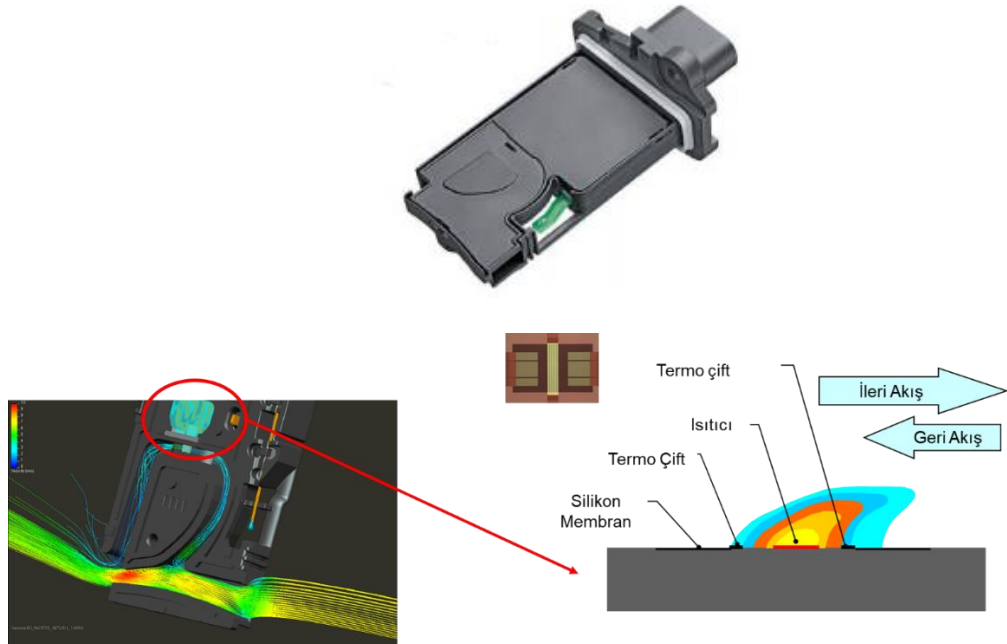


Şekil 3.2 : Yakıt ölçüm prensibi [31].

Deneyler sırasında yakıt 735 cihazı yardımıyla 38 °C dereceye koşullandırılarak motora gönderilmiştir.

3.2 Kütlesel Hava Debisi Ölçümü

Motorda kütleli hava ölçümü Continental'e ait HFM tipi sensörle yapılmaktadır. Sensör hem hava debisi hem de bu havaya ait sıcaklık ölçümünü yapabilmektedir. Isıtılmış bir tel üzerinden geçen hava telin sıcaklığını değiştirecek yönde etki eder. Telin sıcaklığının değişimiyle beraber üzerindeki gerilimde de değişim meydana gelir. Bu voltaj farkından yararlanılarak kütleli hava debisi ölçümü yapılmaktadır [32].



Şekil 3.3 : Continental kütleli hava ölçüm cihazı ve çalışma prensibi [32].

Motora ait hava ölçüm sensörüne ek olarak, ölçümün doğrulanması ve ek olarak nem kontrolünün yapılabilmesi amacıyla, motor test dinamometresine ait başka bir hava ölçüm düzeneği olan ABB marka Sensyflow [33] kullanılmıştır.

3.3 Gaz Basıncı ve Sıcaklık Ölçümü

Gerçekleştirilen testlerde, gerekli görülen konumlardaki gazların basınç ve sıcaklık değerleri okunmuştur. Bu ölçümler Kistler 4080BT piezoresistif basınç sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sensörler son derece dayanıklı ve araç testleri olmak üzere çeşitli alanlarda da kullanılabilmektedir. Basınç sensörünün ölçüm aralığı 0 – 10 bar arasındadır. Çalışma aralığı ise 30 °C ve 150°C arasında olup, bu değerler içerisindeyken $\pm 2\%$ hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir [34].



Şekil 3.4 : Kistler 4080BT basınç ölçüm sensörü [34].

Motor deneylerinde kullanılan sıcaklık ölçümleri ise K tipi termometreden faydalanılarak elde edilmiştir. Bu termometre nikel alaşımları ile üretildiğinden korozyon yönünden oldukça avantajlıdır ve çalışma aralıkları çok geniş olduğu için hava emiş tarafı ve egzoz tarafında ölçüm alınabilmektedir. Çalışma aralığı -270°C ve $1,260^{\circ}\text{C}$ derecedir.

3.4 Azot Oksit Emisyon Ölçümü

Deneyler sırasında azot oksit emisyonlarının ölçümü AVL markasına ait AMA i60 model cihaz yardımıyla yapılmıştır. Cihazın birden fazla konumdan ölçüm alabilme kapasitesi olduğundan, hem motor çıkışından hem de egzoz arındırma sistemi sonrasında eş zamanlı olarak ölçüm alınabilmektedir. Azot oksit emisyonlarının yanı sıra, HC ve CO ölçümü de yapılabilir.



Şekil 3.5 : AVL AMA Emisyon Ölçüm Cihazı [35].

3.5 Partikül Madde Ölçümü

Deneyler sırasında kurum emisyonlarının ölçümü AVL markasına ait Micro Soot Sensör model cihaz yardımıyla yapılmıştır. Motor çıkışındaki kurum miktarları mg/mm³ mertebesinde ölçülebilmektedir. Cihazın ölçüm aralığı 0,001 – 50 mg/mm³ mertebesinde dir. Ölçüm frekansı 10Hz – 100Hz aralığındadır.



Şekil 3.6 : AVL MicroSoot Emisyon Ölçüm Cihazı [36].

3.6 Turboşaft Hızı Ölçümü

Emisyon, gaz sıcaklık ve basınçları ve yakıt ölçümüne ek olarak değişken geometrili aşırı doldurma sisteminde şaft hızı ölçümü de yapılmıştır. Aşırı doldurma sistemindeki pervanenin bıçakları elektrik akımını ileten materyalden üretilmiştir. Şaft hızı sensörü Micro-Epsilon'a ait Turbo Speed DZ 140 modelidir. Ölçüm aralığı 200 d/d ile 400.000 d/d arasındadır.



Şekil 3.7 : Turboşaft Hızı Ölçümü [37].

4. DİNAMİK EMİSYON KONTROLÜ

Motorun yakıt ve hava yolu kontrol yönetimi yapılırken motor sabit motor hız ve sabit motor yükünde çalışmaktadır. Bu kontrol yönteminde; motor yakıt tüketimi, emisyonlar ve motor üstündeki limitlere (türbin giriş sıcaklığı, kompresör çıkış sıcaklığı, maksimum silindir içi basıncı vs.) dikkat edilerek çalışmalar tamamlanır. Motor, sabit motor hızı ve sabit yükteyken başka bir noktaya götürülmek istendiğinde hedeflenen noktadaki motor hızı ve yük değerindeki hava debisine ulaşmak için hava yolu kontrolü yapılır. Örneğin gidilmesi istenen noktada talep edilen hava debisi mevcut debiden yüksekse, motor EGR valfini tamamen kapatır ve gaz kelebeğini tamamen açarak motorun bir an önce hedeflenen noktadaki hava debisi değerlerine ulaşmasını sağlar. Eğer motorun çalışması istenen motor ve güç değerindeki talep edilen hava debisi motorun o an çalıştığı noktadaki hava debisinden düşükse, EGR valfini ve gaz kelebeğini açarak hedef noktanın hava debisi değerlerine ulaşmaya çalışır.

Yukarıda verilen örneklerde motor ani olarak daha yüksek hava talebinde bulunduğu noktaya ulaşır ve sabit olarak bu noktada bir süre çalıştıktan sonra sıcaklıklar, basınçlar ve emisyon seviyeleri sabit bir seviyeye oturarak çalışmaya devam eder fakat hedeflenen noktaya çok hızlı bir şekilde (momentini bir an önce oluşturarak) giderken de alabileceği en çok havayı almaya çalışacak şekilde gitmeye çalışır. Bu durumda hedeflendiği sınıra ulaştığı ilk anda hava debisinin anlık olarak hedeflenen hava debisinden yüksek olması sonucunda da emisyon değerlerinde artış yönünde tepecikler oluşur. Bu tepeciklerin oluşması da motorun emisyon standartlarını sağlaması noktasında zorluklar oluşturur. Dinamik manevralarda motorda bahsedilen emisyon tepeciklerinin oluşmasını önlemek veya tepeciklerin boyutunu bir miktar azaltarak çalışması hava yoluna müdahale edilerek düzeltilebilir.

Dinamik manevrada hava yolu kontrolünün çalışmasının mantığında, motor dinamik hareket ederken eğer hedeflenen hava debisi mevcut hava debisinden büyükse motorun bir an önce hedeflenen hava değerine ulaşması için EGR valfini kapatıp ve gaz kelebeğini de en çok hava geçecek şekilde açık kalmasını sağlamaktansa bir miktar

EGR valfini açar. Dinamik manevrada EGR akışı istenirken doğrudan EGR valfine müdahale edilmez ve bunun yerine dinamik manevrada hedeflenen noktanın hava debisi talep değerine manipülasyon yapılır. Bu manipülasyon yapılırken de hedeflenen noktadaki dolgu basıncıyla mevcut dolgu basıncı arasındaki oran kontrol edilir. Oranın artması ve azalmasına bağlı olarak hedeflenen hava debisine manipülasyon seviyesi hesaplanır. Bu sayede mevcut ve hedeflenen noktanın arasındaki fiziksel çalışma şartlarının farklılığının büyüklüğüne bağlı olarak hedeflenen hava debisi değerini düşürücü yönde müdahale yapılır ve emisyon seviyelerinde iyileştirme yaparak motorun çalışmasına katkıda bulunur.

4.1 Hedef Nokta Veya Mevcut Noktaya Göre Manipülasyon Yapılması

Motor sabit bir noktada çalıştığı durumdan daha yüksek hava debisi talebinde bulunan bir noktaya giderken, motor hızı ve motor yükünden sadece biri veya ikisinin birden değeri anlık olarak değişmektedir. Bu değişim olurken hedeflenen motor hızı-yükü değerlerindeki hava debisine ulaşmaya çalışmak yerine üstünden geçtiği noktaların motor hızı-yükü değerlerindeki hava debisi değerlerini anlık olarak talep etmesi seçilebilir ve bu hedef değerlere manipülasyon yapılarak motorun hedef motor hızı-yükü değerine ulaşması sağlanabilir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada motorun her zaman hedeflenen motor hızı ve yüküne tekabül eden hedef hava debisinin kullanılması seçilmiştir ve bu seçimin sonucunda da bu değere dinamik manevrada manipülasyon yapılmaktadır. Bunun nedeni, motorun her üstünden geçtiği noktadaki hedef hava debisi değerini kullanması ve buna manipülasyon yapmanın zorluğundandır. Ek olarak, motorda kısa süre içerisinde hedeflenen noktadaki yakıt miktarı atılması istenmektedir fakat motorun belirli bir hızda ve belirli bir hava/yakıt karışımına kadar kurum atmasını engellemek için yakıt yolu limitlenmiştir.

4.2 Çalışma Koşulları, Dinamik Manevra Tespiti Ve Emisyon Stratejisi

Motorun ilk çalıştığında belirli motor suyu sıcaklığı ve egzoz sıcaklığına ulaşana kadar ısıtıldığı çalışma modunda emisyon seviyelerinin düşürülmesi önemlidir. Egzoz sisteminin soğuk olmasından dolayı egzoz arındırma sisteminde SCR kullanılmasının

verimi düşük olduğundan dolayı motordan çıkan NO_x seviyesinin düşürülmesi talep edilen temiz hava miktarına müdahale edilmesiyle yapılacaktır.

Düşük motor hız ve moment bölgesinde emisyon tepelerinin büyük olmamasından dolayı ve ek olarak emisyon kontrol fonksiyonunun sadece aşırı doldurma sisteminin kapalı döngüde çalıştığı alanda aktif olması istendiğinden dolayı, motorun belirli bir devir ve motor yükünden büyük olduğu koşullarda hava yoluna müdahale yapılmıştır.

Motorun dinamik manevrada olduğu, motorun çalıştığı o andaki mevcut doldurma basıncıyla motorun hedeflenen çalışma momentindeki hedeflenen doldurma basıncı arasındaki farka bakarak anlaşılabilir. Değişken geometrili aşırı doldurma kullanılan sistemlerde sabit rejimli manevrada motor hedef basıncı ve motor dolgu basıncı eşit olmaktadır. Ancak dinamik manevralarda hava yolunun ataletinden ötürü oluşan gecikme ile motorun dinamik manevrada olup olmadığı tespit edilebilir.

4.3 Motordaki Temiz Hava Debisinin Hesaplanması

Hava yolunu manipüle ederken kullanılacak ve dikkate alınacak hava debisinin, motordaki hava debisi ölçüm sisteminden faydalanılarak mı yoksa motor üstünde hava debisi hesaplayan modellerden mi faydalanacağını seçimi yapılabilir. Bu tez kapsamında sensör değerlerinden faydalanarak çalışmalar yapılmıştır.

4.4 Dinamik Hedef Hava Debisi ve Dinamik EGR Oranının Hesaplanması

Emisyon kontrolü aktif değilken motor alabileceği maksimum havayı alacak şekilde çalıştırılır ve bu havayı alırken de atacağı yakıt minimum lamladan hesaplanır. Hava yolu manipüle edileceği zaman da aracın minimum lambda yani kurum limitinden bir miktar daha güvenli yerde kalmak için talep edilen havanın minimum duman limitine yakın olması gerekir. Bu çalışma kapsamında minimum lambda değerlerinin dinamik manevrada alınacak minimum hava değeri olarak belirlenmesi yerine, daha önceden belirlenmiş kurum limiti değerlerini birden büyük bir faktörle çarparak minimum talep edilen hava olarak belirlemek daha mantıklıdır.

Motor, öncelik olarak hava debisin tutturmaya yönelik kontrol edildiği için dinamik manevrada hesaplanan hedef EGR oranının önemi yoktur fakat motor EGR oranı hedefiyle de kontrol edilebilir. Kontrolün EGR oranı hedefiyle çalıştığı durumlarda yüksek irtifa veya soğuk koşullarda motorun düzgün çalışmasında sıkıntı yaşanacağı

gibi dinamik manevralarda da performans kaybı oluşturma ihtimali yüksek olduğu için motorların hava debisi hedefini tutturarak çalıştırılmasıyla birlikte motor daha sağlıklı bir şekilde kontrol edilmektedir.

4.5 Dinamik Manevrada Düzeltilmiş Hava Debisi Hedefi Ayarlama Fonksiyonu

Durağan ve dinamik hava debisi hedefi geçişi yapılırken eğer dinamik emisyon kontrolü aktif değilse, model motorun bulunduğu nokta değiştiği zaman gideceği noktanın hava debisini elde edecek şekilde turbo, EGR valfi ve gaz kelebeğini kontrol eder. Eğer dinamik emisyon kontrolü aktifse de minimum hava debisi duman atma debisi (minimum lambdanan hesaplanan) veya daha yukarda olacak şekilde hedefte düzeltme yapar. Sonuç olarak, motorun dinamik emisyon kontrolü aktif değilken aldığı hava miktarından daha az hava alacak ve duman atma sınırının da üstünde hava alacak şekilde dinamik koşullarda hava debisi elde edilmiş olunur. Durağan hal hava debisi değeri, dinamik manevra faktörü ve dinamik manevrada hedef hava debisiyle düzeltilerek sonuç olarak dinamik manevrada düzeltilmiş hedef hava debisi elde edilmektedir.

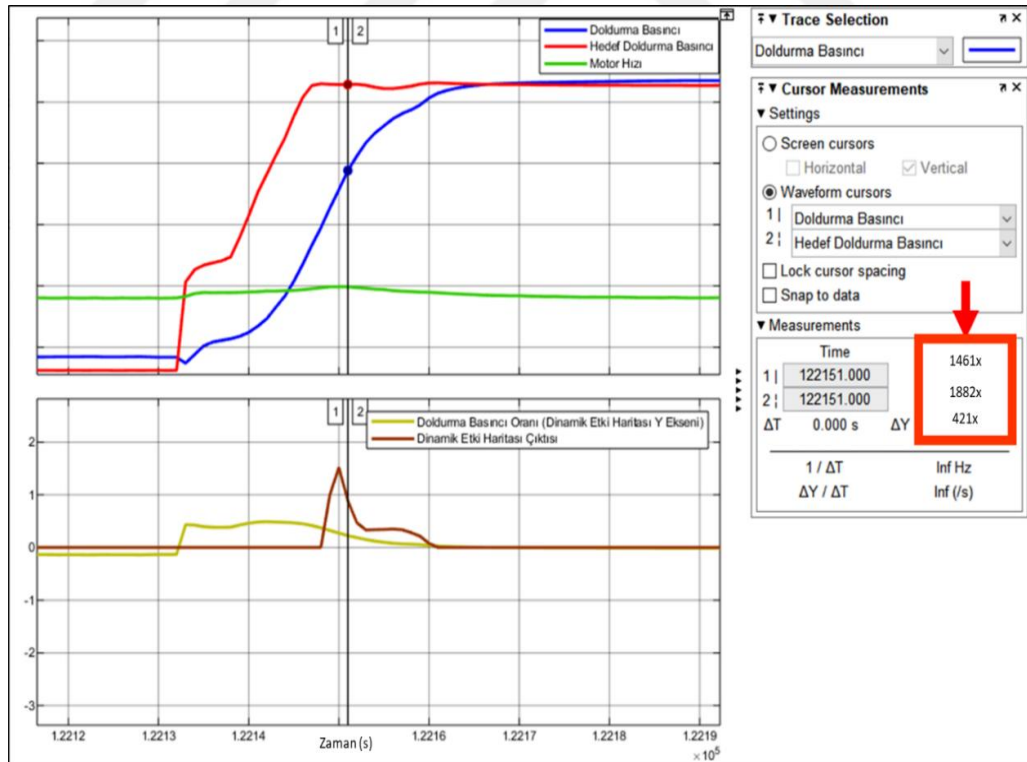
4.6 Model Kurulumu ve Doğrulanması

Dinamik manevrada emisyon kontrolü ve talep edilen hava miktarının nasıl belirlendiği anlatılmıştı. Şimdi bu fonksiyonun “MATLAB SIMULINK” yazılımı yardımıyla oluşturulması anlatılacaktır. Bu yazılımla model oluşturulduktan sonra modelde gerçek test verileri çalıştırılmıştır. Burada yapılan işin ilk amacı “Simulink” ortamında kurulan modelle gerçekte test yapılan motorun ECU’sunda çalışan denklemin birbirini doğrulanmasıdır. Bu doğrulama tamamlandıktan sonra da dinamik manevrada alınan hava miktarı “Simulink” modeli yardımıyla kontrol edilecektir. Hava kontrolü yapılırken de motorun dinamik emisyon kontrolü kullanılmadan adım testinde dinamik manevrada maksimum aldığı hava incelenecektir ve dinamik emisyon kontrolü aktif edildiği durumda da motor aynı adım testinde alabileceği maksimum hava miktarından daha az hava alınmaya çalışılacaktır.

Dinamik emisyon kontrolü sadece motorun soğuk çalışma modunda çalışması istenmektedir. Eğer motorun mevcut çalışma moduyla eşit olursa da modelin bu kısmının aktif olmasını sağlayacaktır.

Motorun EGR oranı hedefiyle çalıştığı durumlarda EGR oranı hedef fonksiyonu çıktısı girdi olarak kullanılır fakat bu çalışmada strateji her zaman hava hedefini sağlamaya çalışmaktır.

Motordaki turbo pozisyonu, sadece mevcut hız ve yük belirli bir motor hızı ve yükü üstündeyken kapalı döngüde çalışmaktadır. Kapalı döngüden bahsetmek gerekirse de, motordaki hedef doldurma basıncını ve hedef hava miktarının sağlanması için turbo pozisyonu değiştirilerek dolgu basıncı tutturulur ve ek olarak EGR ve gaz kelebeği kullanılarak da hedef hava değeri sağlanmaya çalışılır. Belirli bir yükün altındayken bu kontrolcüler hedeflerini sağlarken birbirleriyle çakışarak sürekli aç kapat döngüsüne düşer. Bu döngüden kaçınmak için de turbo pozisyonu açık döngüde tutularak motor yükü ve hızına bağlı olarak hedef boost basıncını tutturmak yerine hedef turbo pozisyonuna gider fakat EGR ve gaz kelebeği hedef hava debisini sağlamak için PID kontrolcülerini vasıtasıyla pozisyon değiştirirler. Dinamik manevrada hava talebi kontrolü de turbonun kapalı döngüde çalıştığı noktalarda aktif olması üstüne tasarlanmıştır. Bu durum için hedef dolgu basıncı ve mevcut dolgu basıncı arasındaki orana bakılarak dinamik manevra olduğu tespit edilir.



Şekil 4.1 : Adım testinde dinamik manevra parametrelerinin Matlab’da gösterimi.

Mevcut doldurma basıncı hedefin kaldığı süre boyunca da doldurma basıncı oranı hesaplanmaktadır. Dinamik emisyon kontrolünün olabildiğince motor performansını az etkilemesi için de bu fonksiyona belli bir doldurma basıncı oranından daha az oranda fark varken izin verilmektedir.

Motorda hava debisini ölçen bir sensör bulunmaktadır ve ayrıca bu hava miktarı, gaz keleşbeği ve EGR valfi üzerinden geçen hava akışını hesaplayan modeller kullanılarak da hesaplanabilir. Motorda sensör bulunduğundan dolayı sensör verisinin kullanılması seçilmiştir. Sensörden okunan değerlerin birimi “kg/h” cinsindendir ve bu modelde kullanılmak üzere “mg/stroke” birimine çevrilmektedir.

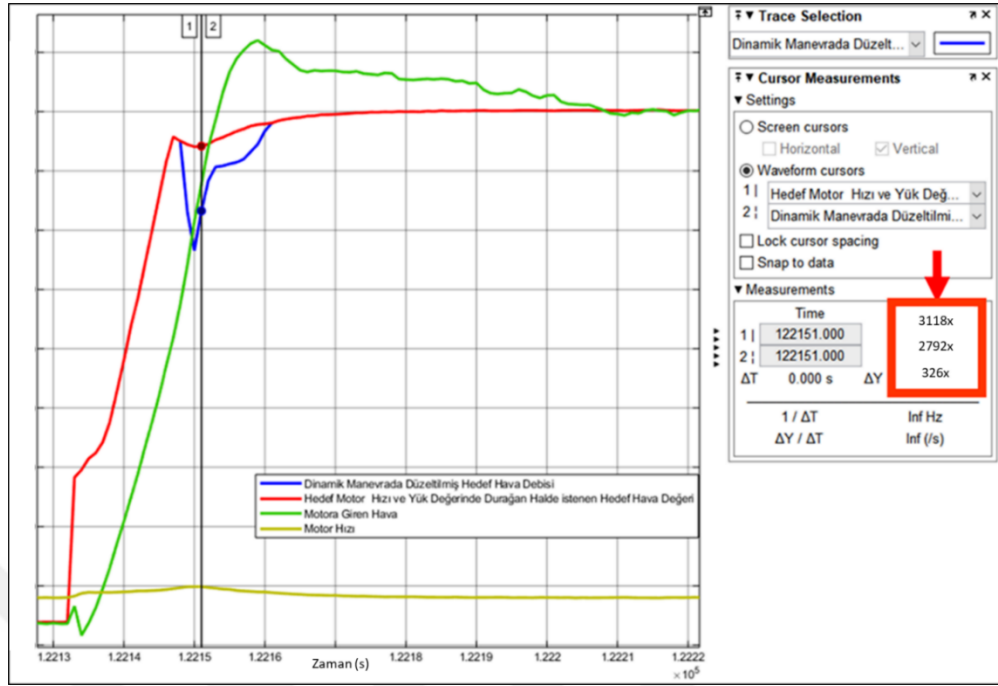
Fonksiyonda kullanılacak hava debisi aşığıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\dot{m}_{\text{hava}} = \frac{\text{Hava Debisi Sensörü} * 2 * 1000000}{\text{Silindir Sayısı} * 60 * \text{Motor Hızı}} \left[\frac{\text{mg}}{\text{stroke}} \right] \quad (4.1)$$

Çalışmada kullanılan motor sıralı altı silindirli aşırı doldurmalı bir sistemdir. Hava debisi hesabı yapılırken, sensörden alınan hava debisi değeri Denklem 4.1’de görüleceği üzere mg/str biriminden kilogram/saat birimine çevrilmiştir.

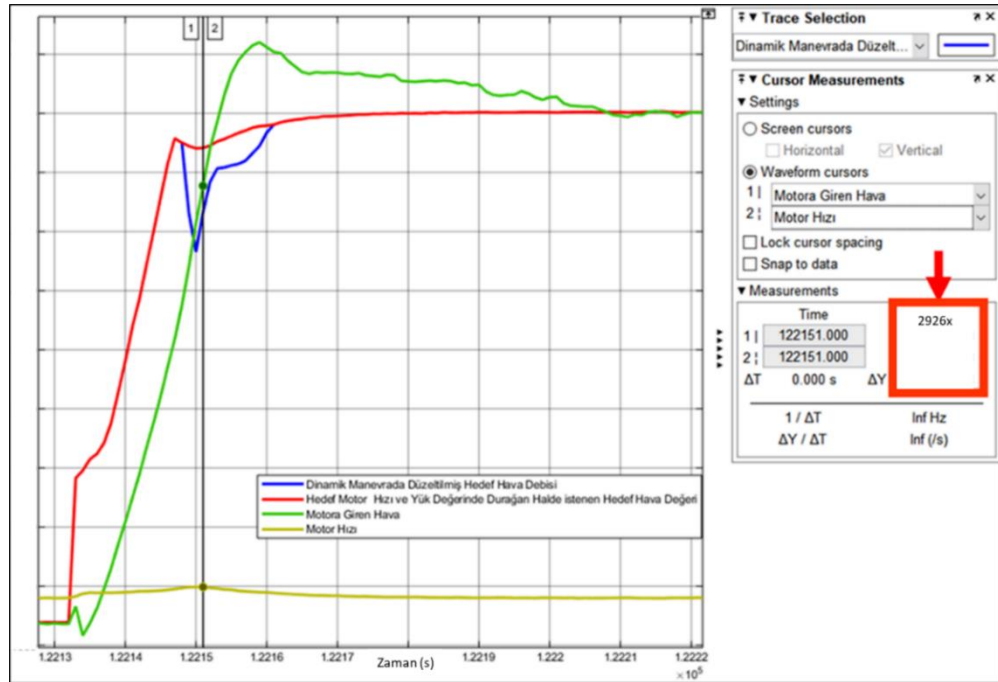
Aşırı doldurmalı dizel motorlarda hacimsel verim kullanılarak da hava debisi modellenebilmektedir. Bu model yapılırken, motorun aşırı doldurma basıncı, emme manifoldundaki havanın sıcaklığı, motorun bulunduğu devir ve silindir sayısı kullanılmaktadır. Bu modeli EGR sistemine sahip motorlarda kullanırken hesap sonucunun hava debisi ve EGR miktarının toplamı olduğuna dikkat edilmelidir. Dolayısıyla bu model sadece EGR akışının olmadığı yani EGR valfinin tamamen kapalı olduğu durumlarda temiz hava debisinin hesaplanmasını sağlamaktadır.

Dinamik manevrada hedef hava debisi hesaplandıktan sonra sıra dinamik manevrada asıl kullanılacak düzeltilmiş hava debisini elde etmeye gelmiştir. Öncelikle motorun hava debisi hedefiyle çalışıp çalışmayacağı kontrol edilir. Sonrasında da daha önceden belirtilmiş olan motorun dinamik manevrada olup olmadığı, motor hızı ve hedef moment hedefinde izin kontrolü ve mevcut çalışma moduyla istenen çalışma modunun uyup uymadığı kontrol edilir. Eğer dinamik manevrada temiz hava manipölasyonu şartları uygunsa, motorun bulunduğu hızı ve momentinde, durağan haldeki hava hedefi dinamik emisyon kontrolüyle manipüle edilerek motorun hedef hava debisi azaltılmış olur. Böylece motor daha az hava alarak hedef momentine ulaşır ve bunun sonucunda da NOx emisyon tepeleri azaltılmış olur.



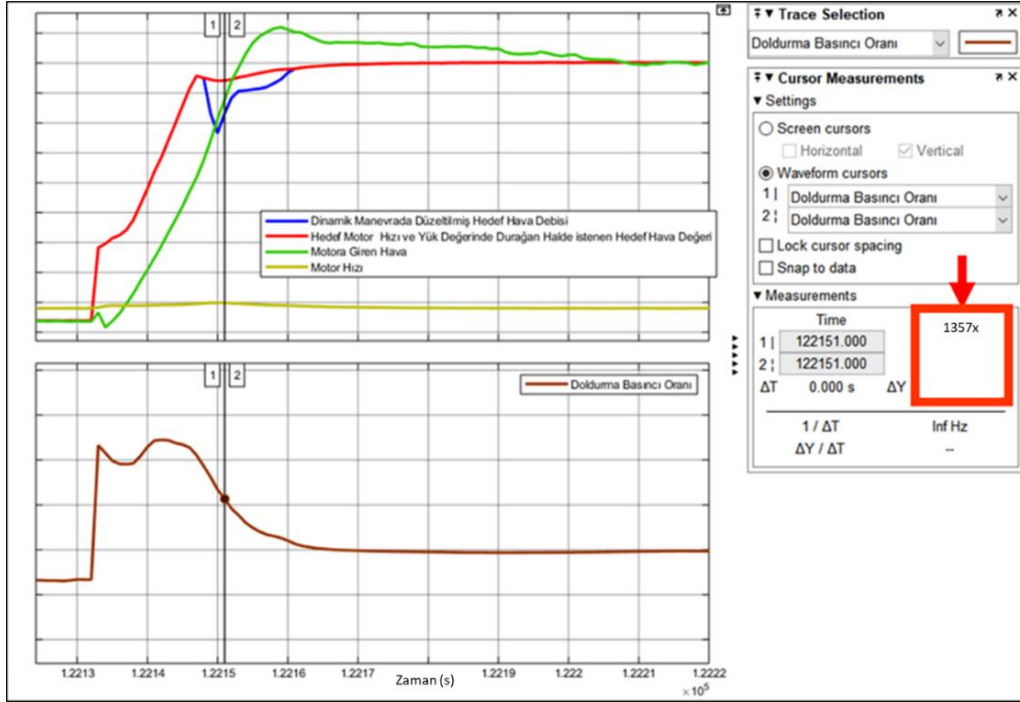
Şekil 4.2 : Düzeltilmiş hedef hava debisi ve durağan haldeki hedef hava değeri.

Şekil 4.2’de şekilde de gözüktüğü üzere, Simulink yazılımıyla kurulan modelde, anlatılan örnek için dinamik manevrada hava debisi manipölasyonu aktif değilken istenen hava debisi kırmızı çizgiyle gösterilen eğridir. Eğer bu fonksiyon aktif edilmiş olsaydı da talep edilen hava debisi değeri mavi eğri olacaktır.



Şekil 4.3 : Motora giren hava miktarı ve motor hızı.

Bu anda motora giren hava debisi ve motor hızı incelenecek olursa, motor hızı örnektekiyle aynı değerdedir. Buradan da anlaşılacağı üzere daha önceden de bahsedildiği gibi motorun alabileceği maksimum havadan daha düşük hava debisi istenerek motorun hedefe ulaşırken ortaya çıkarttığı NOx emisyon tepecik boyutlarının azaltılması hedeflenmiştir.



Şekil 4.4 : Doldurma basıncı oranı.

Dinamik manevrada hava debisi kontrolü kapalıyken alınan hava debisinin bir miktar hedefi aştığı ve belli bir süreden sonra hedefine ulaştığı gözlemlenmiştir. Burada daha önceden de bahsedildiği gibi doldurma basıncının, hedefiyle arasındaki orana bakılarak hava debisi kontrolünün manipülasyon yapması sağlanır ve hedefe ulaşılırkenki hava debisinin hedefin üstünde kalacak şekilde tepcik yapmasının önüne geçilir. Şekil 4.4 incelendiği zaman da dinamik emisyon kontrolünün şartları sağlandıktan sonra doldurma basıncı oranına bakılarak hedef hava debisi değerine manipülasyon yapılır. Dinamik manevranın yakalandığı bu oran %3 değerinin altına düştüğü zaman da dinamik manevrada hava debisi manipülasyonu kapatılır. Bunun sebebi, motordaki doldurma basıncı, hedefi sürekli %0 oranla sağlayamaz ve bir miktar sapmalar meydana gelir. Sürekli hedef hava debisine manipülasyon yapılması da motordaki kontrolcülerin sürekli hedefini değişmesine neden olarak kontrolcülerin hedefleri sağlamaya çalışırken sapmalarında artış meydana getirebilir.

4.7 Dinamik Hava Debisi Talebinin Optimizasyonla Belirlenmesi

Dinamik manevrada hava debisini manipölasyonunun motor üstünde yapılması oldukça zaman alıcı bir iştir ve yapılan işin sonuçlarının doğruluğunu çalışmak da oldukça vakit alıcıdır. Tezin öncelikli amacı test yükünü azaltmak adına fonksiyonun kapalı olduğu durumdaki hava debisi değerlerini optimizasyon yoluyla signal tracking fonksiyonuyla manipüle etmektir. Hava debisi isterlerinin belirlenmesi için önce Çizelge 4.1’de manevraları görülebilecek adım testi yapılmıştır. Test esnasında motor çeşitli başlangıç pedal pozisyonlarından farklı pedal pozisyonlarına götürülmüştür. Bu test yapılırken de motor hedef hava debisine ulaşabilmek için alabileceği maksimum havayı almaya çalışarak hedef motor momentine ulaşır. Bu test sonucunda da motorun anlık hava hedefi ve hava debisi değerleri elde edilmiş olunur. Deney sonucunda elde edilen verilerle dinamik emisyon kontrolünün modelinde analiz yapılır.

Çizelge 4.1 : Adım testi matrisi.

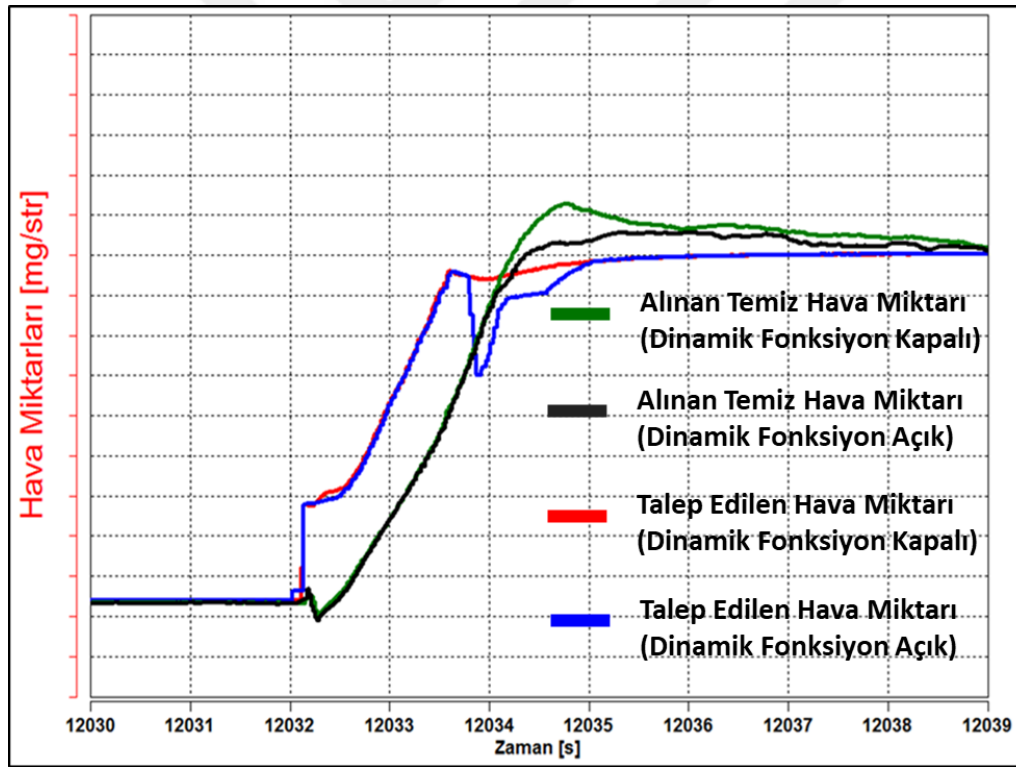
Başlangıç	Hedef 1	Hedef 2	Hedef 3	Hedef 4	Hedef 5	Hedef 6	Hedef 7
0	45	55	65	75	85	95	100
10	45	55	65	75	85	95	100
20	45	55	65	75	85	95	100
30	75	100	-	-	-	-	-
35	45	55	65	75	85	95	100
40	75	100	-	-	-	-	-
45	55	65	75	85	95	100	-
50	75	100	-	-	-	-	-
55	65	75	85	95	100	-	-
75	85	95	100	-	-	-	-

Modelde çalışma yapılırken de öncelikle modelin doğru çalıştığından emin olunur. Modelin doğru bir şekilde çalıştığından emin olduktan sonra da datalar yardımıyla dinamik emisyon kontrolü aktifmiş gibi modelde aktif edilir ve bu fonksiyonla motorun hedeflediği hava debisi değerleri gerçek motorda test yapılmış gibi manipölasyon yapılabilir. Test matrisi soğuk çalışma modunda test edilmiştir, motorun moment 45 pedaldan daha büyük durumda aktif olacak şekilde test matrisinin minimum hedefi ayarlanmıştır ve daha önce de bahsedildiği gibi belirli bir doldurma basıncının altında ve %3’lük bir doldurma basıncı oranı farkından büyük olduğu durumda çalışması ayarlanmıştır.

MATLAB modelinde motorun anlık olarak aldığı hava miktarının %95’i ve eğer motora giren hava, hedef motor hızı ve yük değerinde durağan halde istenen hedef hava değerini aşarsa da hedef hava değerinin %95’ini talep edecek şekilde

fonksiyonun manipölasyon yapması sağlanmıştır. Model çıktıların bu şekilde manipölasyon yapması da girdilerin optimizasyonla doldurulması sağlanarak tamamlanmıştır. Motor aynı noktalardan geçerken her zaman aynı hava debisi ve doldurma basıncıyla geçmeyeceği için de optimizasyon metodolojisiyle istenilen hedefe en az hatayla ulaşılmış olunur. şekil 4.5'te gösterilen fonksiyonun manipölasyon sonucu dūřürdüęü hedef hava debisi değeri de bu şekilde elde edilmiştir.

Model kontrolü sağlandıktan ve bu modelle birlikte gerçek motor testi yapıldıktan sonra, dinamik emisyon kontrolünün gerçek motorda çalıştığı ve çalışmadığı durumların kıyaslaması aşağıdaki gibidir. Görselde görüleceği üzere modelde talep edilen hava debisi hedefiyle gerçekteki hedef debiler birbirlerine çok benzemektedir. Motor dinamik olarak çok hızlı hareket ettiği için talep edilen hava debisini anında tutturması beklenmemektedir fakat fonksiyonunun aktif edilmesi durumunda aldığı hava debisi değerinde ciddi bir dūřüş gözlemlenmektedir.



şekil 4.5 : Dinamik fonksiyonun aktif olup olmadığı durumdaki sonuçlar.

Modelin optimizasyonu yapılırken de MATLAB yazılımındaki “Gradient descent” methodu ve “Sequential Quadratic Programming” algortimasından faydalanmıştır.

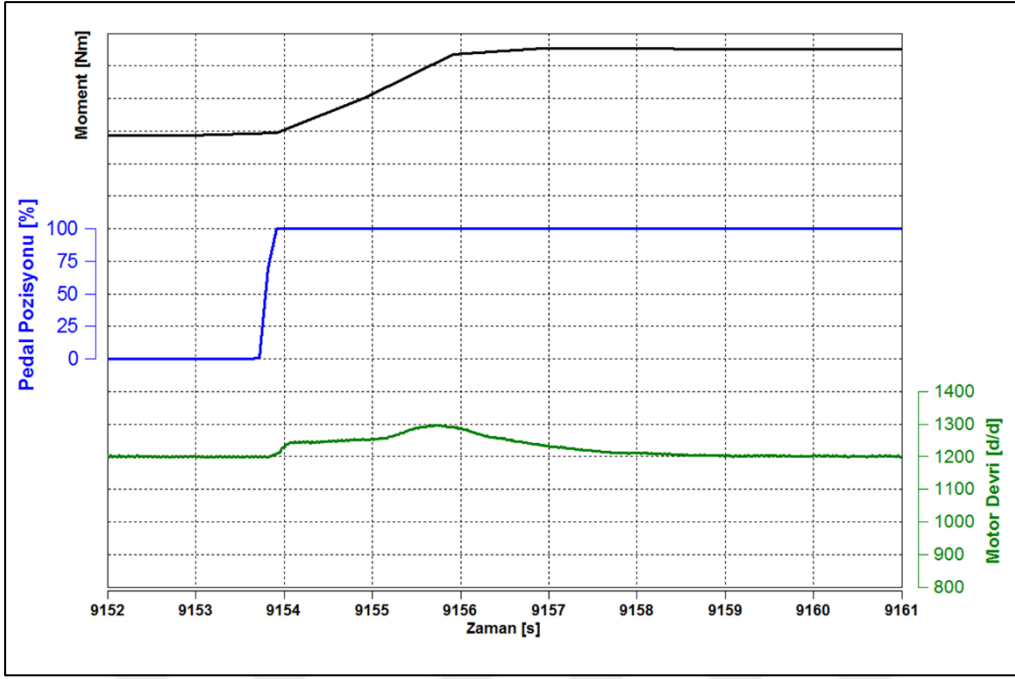
5. ADIM VE EMİSYON TESTLERİ SONUÇLARI

Dinamik emisyon kontrolünün etkilerini inceleyebilmek ve optimize edebilmek adına iki temel test çevrimi deneyi oluşturulmuştur. Bunlardan ilki, step testi olarak bilinen adım testidir. İkinci deney düzeneği ise emisyon regülasyonu ve otoritesi tarafından belirlenen WHTC, PEMS vb. emisyon test çevrimleridir.

5.1 Adım Testleri Sonuçları

Taşıtlar hızlanma ve kısmi ya da tam yüke çıkma işlevini elektronik kontrol ünitesi (ECU) yardımıyla pedaldan gelen pozisyon bilgisi sayesinde gerçekleştirir. Sürücü gaza basmadığı zaman pedal pozisyon bilgisi ECU tarafından yüzde sıfır olarak okunur ve motor harici moment talepleri dışında (hız sabitleme sistemi vb.) moment vermez. Sürücü gaz pedalına bastığı zaman, pedal pozisyon bilgisi ECU’da okunarak, bağlantılı haritalar vasıtasıyla moment bilgisine çevirir. Moment bilgisi kullanılarak yakıt ve hava haritalarından alınan değerler ile yanma işlemi başlar. Sıfır pedal konumundan tam yük durumuna gidildiğinde, yakıt ve hava haritalarında tam yüke karşılık gelen değerler kullanılarak motor tam yüküne ulaşmaya çalışır. Sabit rejim manevralarına göre geçici rejim manevralarında hava fazlalık katsayısının ani düşümü sebebiyle azot oksit ve kurum emisyonları tepe noktası yapmaktadır. Dinamik manevralarda emisyon kontrolü sayesinde azot oksit emisyonlarındaki tepe noktalarının azaltılması amaçlanmıştır.

Dinamik emisyon kontrolünün etkisinin en net ve hızlı şekilde çalışılabildiği deney düzeneği adım testleridir. Adım testlerinin amacı sürücünün ani manevra tepkilerini motor dinamometresinde kontrollü deney ortamında gözlemlemektir. Motor dinamometresi birden fazla kontrol yöntemiyle çalışabilmektedir. Bunlar motor hızı – tork, motor hızı – pedal kontrolü olarak sayılabilir. Adım testlerinde dinamometre motor hızı ve pedal kontrolü moduna alınır. Adım testinin gerekliliği olarak, motor bulunduğu pedal pozisyonundan, talep edilen pedal pozisyonuna olabilecek en hızlı sürede götürülmeye çalışılır. Pedal talep edilen pozisyona götürülürken, motor hızı sabit tutulmaya çalışılır.



Şekil 5.1 : Motor dinamometresinde gerçekleştirilen örnek adım testi.

Dinamik emisyon kontrolünün etkisi incelenirken, motor çeşitli hızlarda, farklı pedal pozisyonlarına götürülerek emisyon etkisi incelenmiştir. Şekil 5.1’de görüleceği üzere, 1200 d/d ile dönen motor, sıfır pedal pozisyonundan tam yük konumuna götürülmüştür.

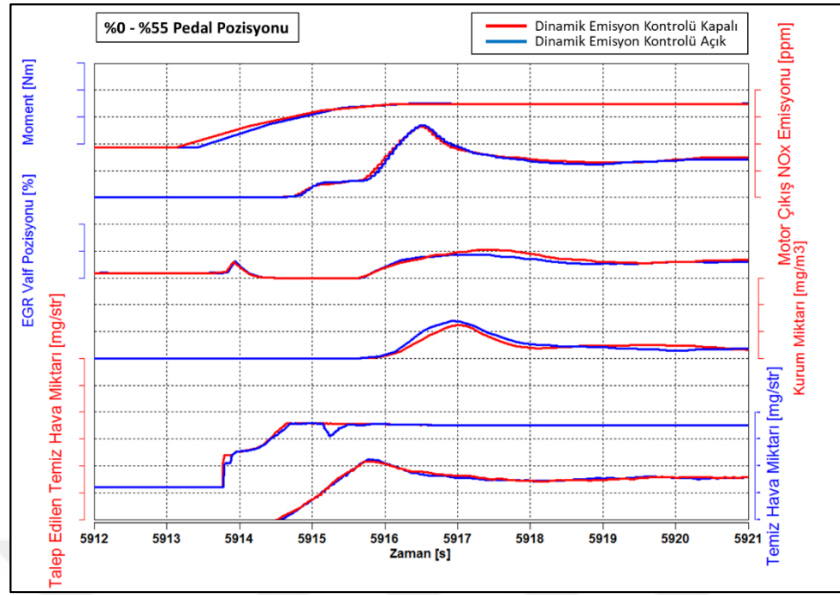
Adım testleri beş farklı motor hızında, çeşitli pedal pozisyonlarında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında emisyon (Azot-oksit ve kurum) ve moment ölçümü alınmıştır. Adım testinin başlangıcı ve bitişi arasında toplam azot oksit ve kurum miktarı gram cinsinden hesaplanmıştır.

Azot oksit emisyonunda gram/saat birimine dönebilmek için, emisyon düzeltme faktörü (EDF) kullanılmıştır. Bunun amacı emisyon değerlerini nem, giriş sıcaklığı gibi parametreleri normalize etmek, testler arasındaki giriş koşullarında olabilen varyasyonları minimize etmektir.

$$\text{Kurum} \left[\frac{\text{g}}{\text{saat}} \right] = \frac{\text{Kurum Miktarı} \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] * \text{Egzoz Gazı Debisi} \left[\frac{\text{kg}}{\text{saat}} \right]}{\text{Egzoz Gazı Yoğunluğu} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]} \quad (5.1)$$

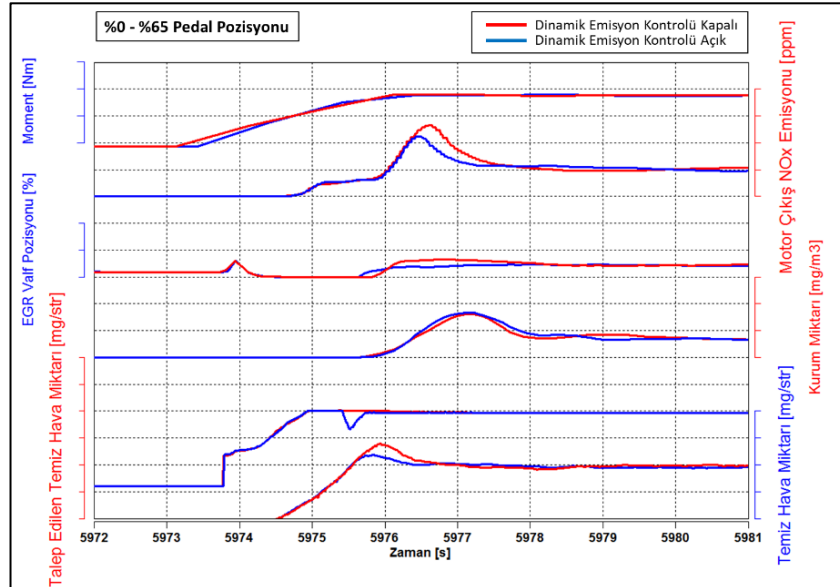
$$\text{NOx} \left[\frac{\text{g}}{\text{saat}} \right] = \text{Egzoz Debisi} \left[\frac{\text{kg}}{\text{saat}} \right] * \text{NOx [ppm]} * 0.001587 * \text{EDF} \quad (5.2)$$

5.1.1 Motor hızının 1000d/d olduğu adım testleri



Şekil 5.2 : %0 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.

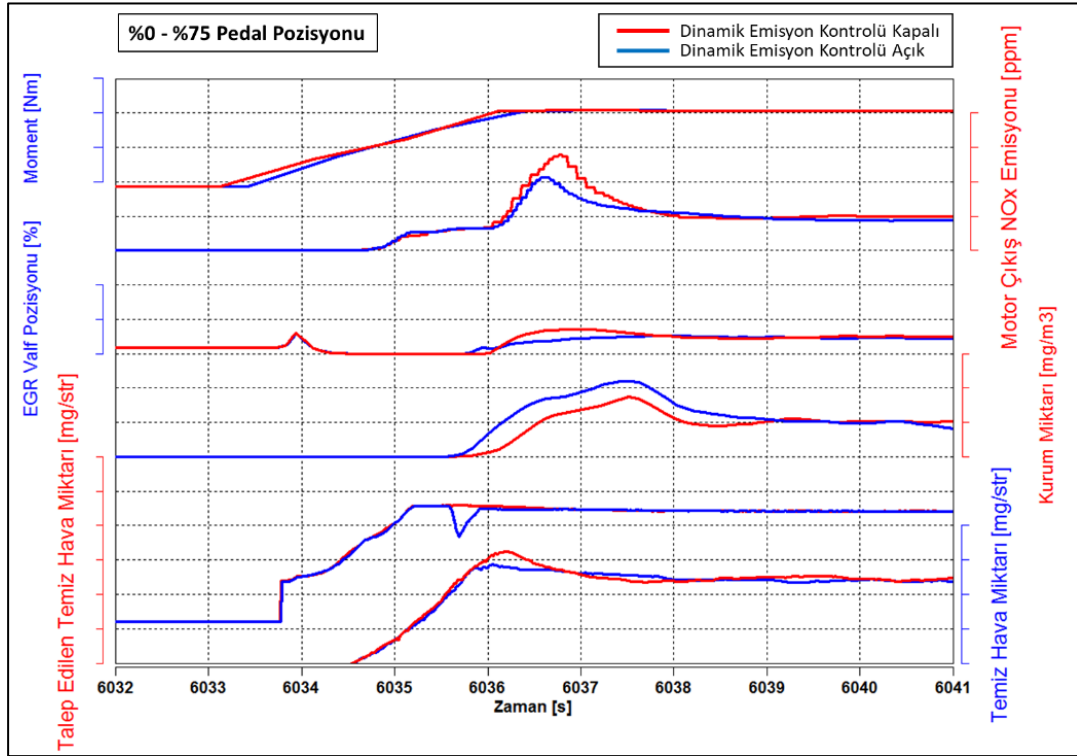
Pedal %0 konumundan %55 konumuna götürülmüştür. Pedal seviyesi %45 üzerinde iken fonksiyon aktif olacağı için ve ek olarak %45 - %55 pedal pozisyonu aralığı çok kısa olduğundan, istenilen hava debisini yakalayacak zaman bulunamamıştır. Şekil 5.2 örneğinde görüleceği üzere, %0 - %55 adım testi manevrasında dinamik emisyon kontrolünün etkisi çok düşük seviyelerdedir.



Şekil 5.3 : %0 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.

Şekil 5.3’de görüleceği üzere, motor 1000 devir/dakika hızında çalıştırılırken pedal pozisyonu %0 konumundan, %65 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon

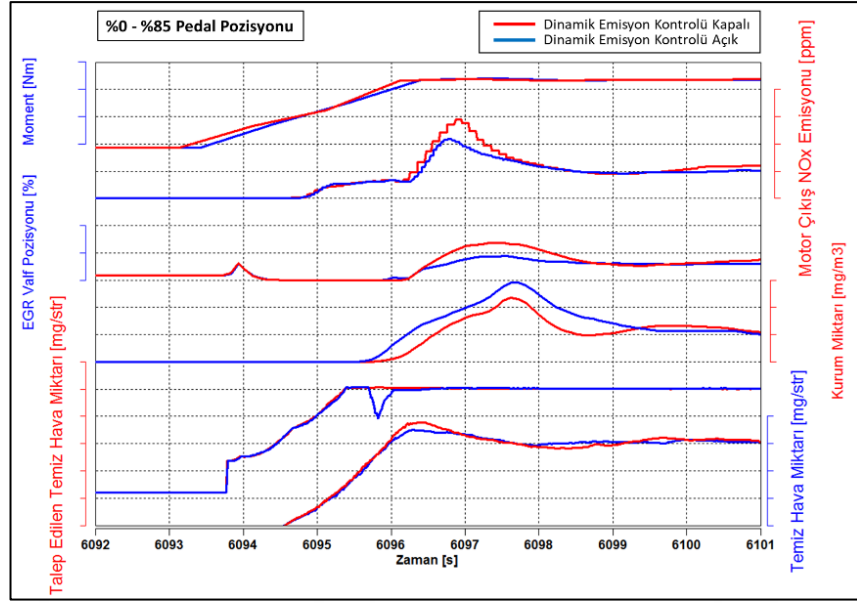
kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Adım testinin başladığı andan, sabit rejime geçtiği ana kadar olan motordan çıkan emisyon miktarı emisyon cihazı ile ölçülmüş, gram olarak hesaplanmıştır. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %14.4 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %6 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.4 : %0 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

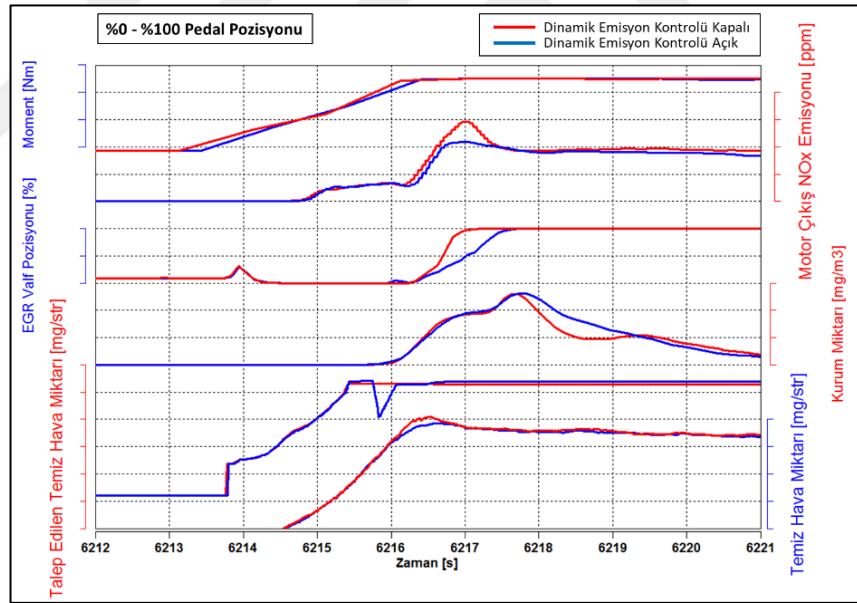
Şekil 5.4’de görüleceği üzere, pedal pozisyonu %0 konumundan, %75 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava debisinin miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren temiz hava debisinin EGR valfinin açılmasıyla azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %16 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %30 artış gerçekleşmiştir.

Şekil 5.5’de görüleceği üzere, pedal pozisyonu %0 konumundan, %85 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava debisinin miktarı düşürülmüştür.



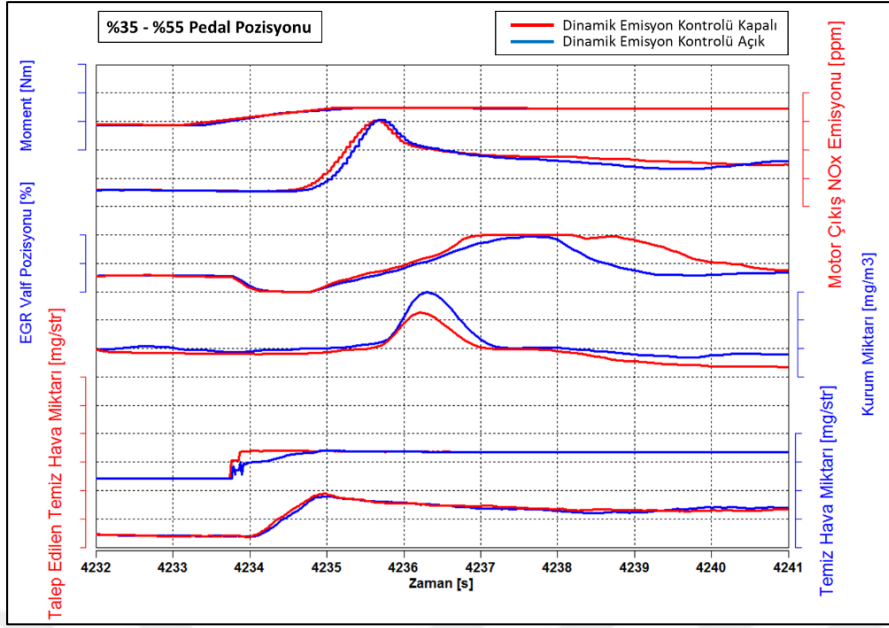
Şekil 5.5 : %0 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.

Şekil 5.5’de gösterilen geçici rejim manevrasında temiz hava azaltılmasına bağlı olarak NOx emisyonunda %14 düşüş, kurum emisyonunda %30 artış gerçekleşmiştir.



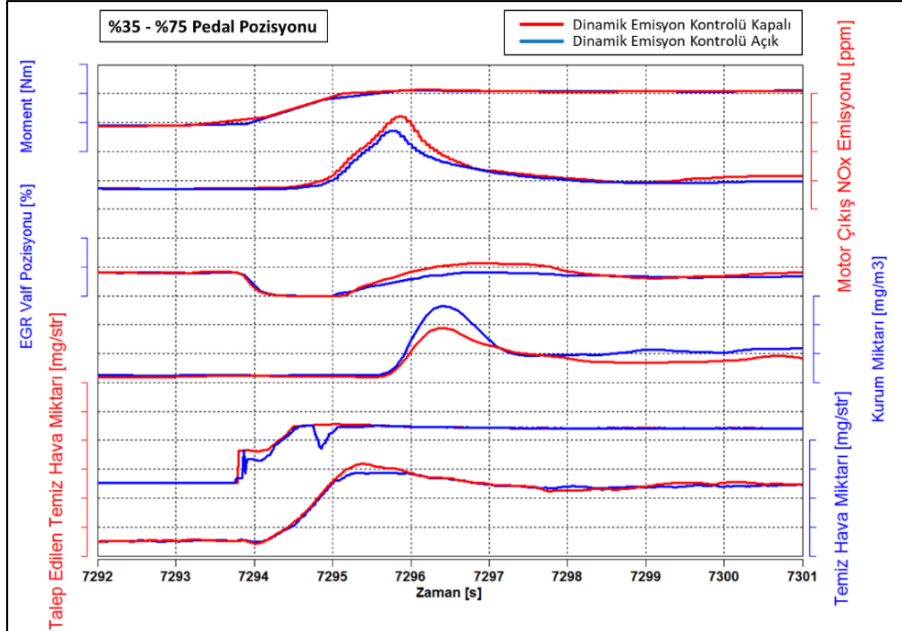
Şekil 5.6 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

Şekil 5.6’da görüleceği üzere, pedal %0 konumundan, %100 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %11 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %12 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.7 : %35 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.

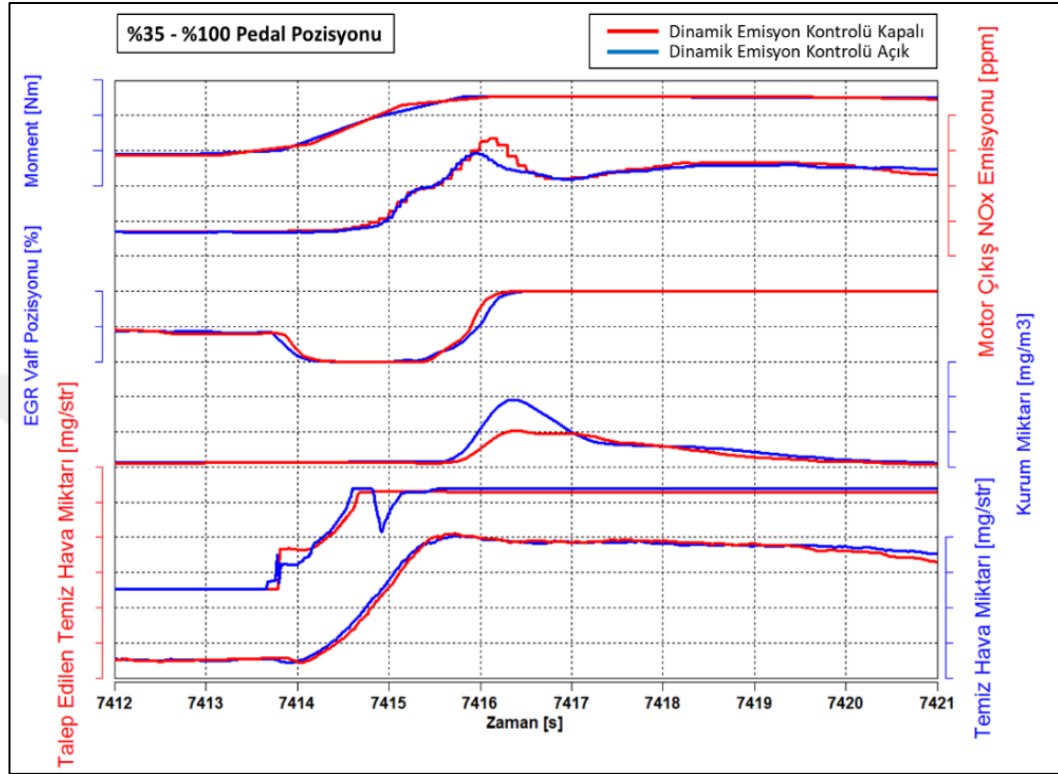
Pedal %35 konumundan, %55 pedal konumuna götürülmüştür. Pedal seviyesi %45 üzerinde iken fonksiyon aktif olacağı için ve ek olarak %45 - %55 pedal pozisyonu aralığı çok kısa olduğundan, istenilen hava debisini yakalayacak zaman bulunamamıştır. Şekil 5.7 örneğinde görüleceği üzere, %35 - %55 adım testi manevrasında dinamik emisyon kontrolünün etkisi çok düşük seviyelerdedir.



Şekil 5.8 : %35 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

Şekil 5.8'de görüleceği üzere, pedal %35 konumundan, %75 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum

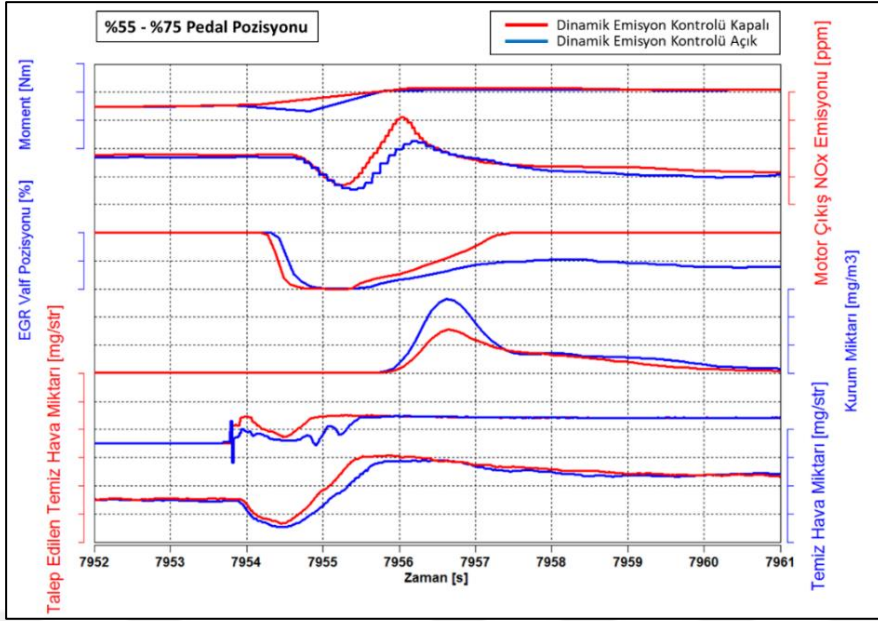
yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %12.5 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %22.5 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.9 : %35 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

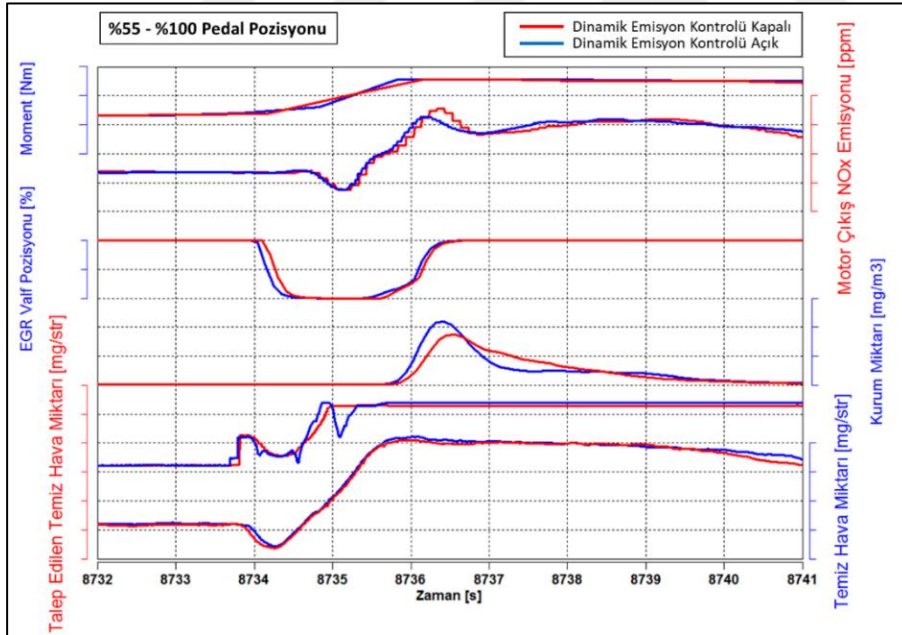
Şekil 5.9’da görülebileceği üzere motor pedal pozisyonu %35 konumundan, %100 pedal konumuna götürülmüştür. EGR akışının zor olduğu bölgede dinamik emisyon kontrolünün kullanımı sınırlıdır. EGR akışının yeteri kadar sağlanamadığı bölgede motor sabit rejimde olsa dahi EGR valfini sonuna kadar açabilir. Eğer bu aksiyonda yeterli olmaz ise gaz kelebeği kısılarak türbin giriş ve manifold basıncı arasında fark arttırılmaya çalışılır. Şekil 5.9 ile gösterilen konumda motor EGR akıtmakta zorlandığı için, dinamik emisyon kontrolü verimli olarak çalışmamıştır. Buna bağlı olarak azot oksit emisyonunda %5 düşüş gerçekleşirken, gaz kelebeğinin kısılmasına bağlı olarak kurum emisyonunda %35 artış gerçekleşmiştir.

Şekil 5.10’da görüleceği üzere, pedal pozisyonu %55 konumundan, %75 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı EGR valfinin açılmasıyla beraber düşürülmüştür.



Şekil 5.10 : %55 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

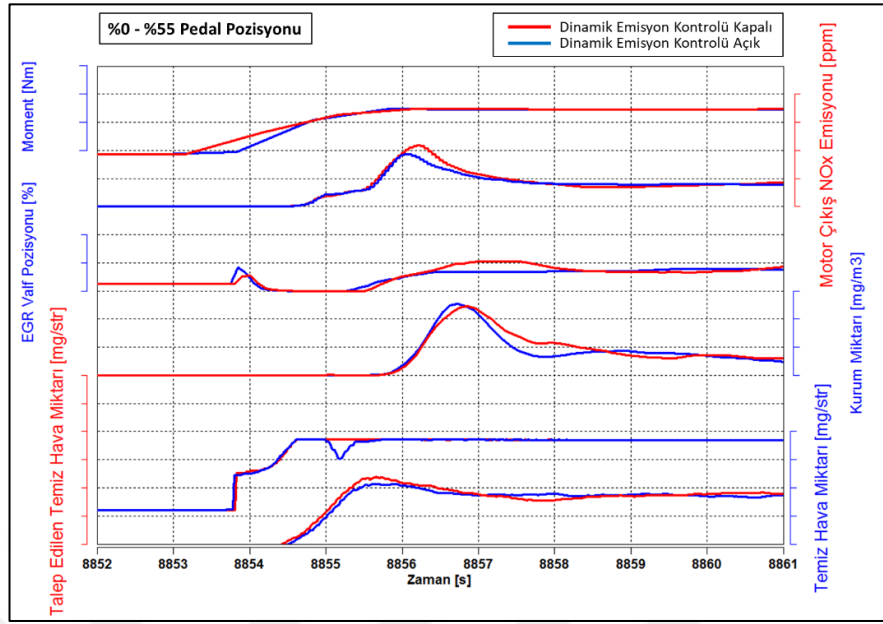
Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak NOx emisyonunda %20 düşüş, kurum emisyonunda ise %40 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.11 : %55 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

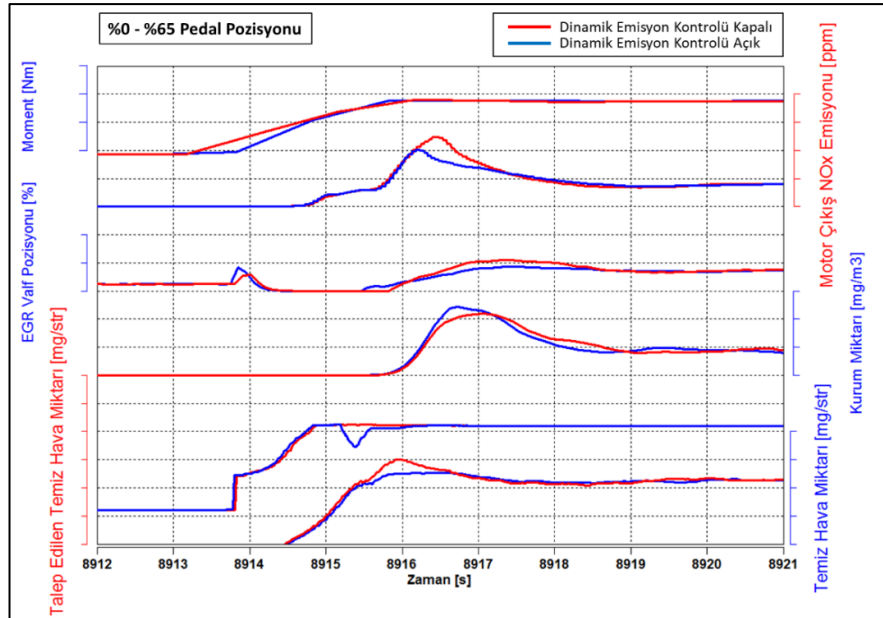
Şekil 5.11’de görüleceği üzere, pedal %55 konumundan, %100 pedal konumuna götürülmüştür. EGR akışının zor olduğu bölgede dinamik emisyon kontrolünün kullanımı sınırlıdır. Şekil 5.11 ile gösterilen konumda emisyon kontrolü verimli olarak çalışmamıştır. Buna bağlı olarak azot oksit emisyonunda %3 düşüş, gaz keleşinin kısılmasına bağlı olarak kurum emisyonunda %11 artış gerçekleşmiştir.

5.1.2 Motor hızının 1200d/d olduğu adım testleri



Şekil 5.12 : %0 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.

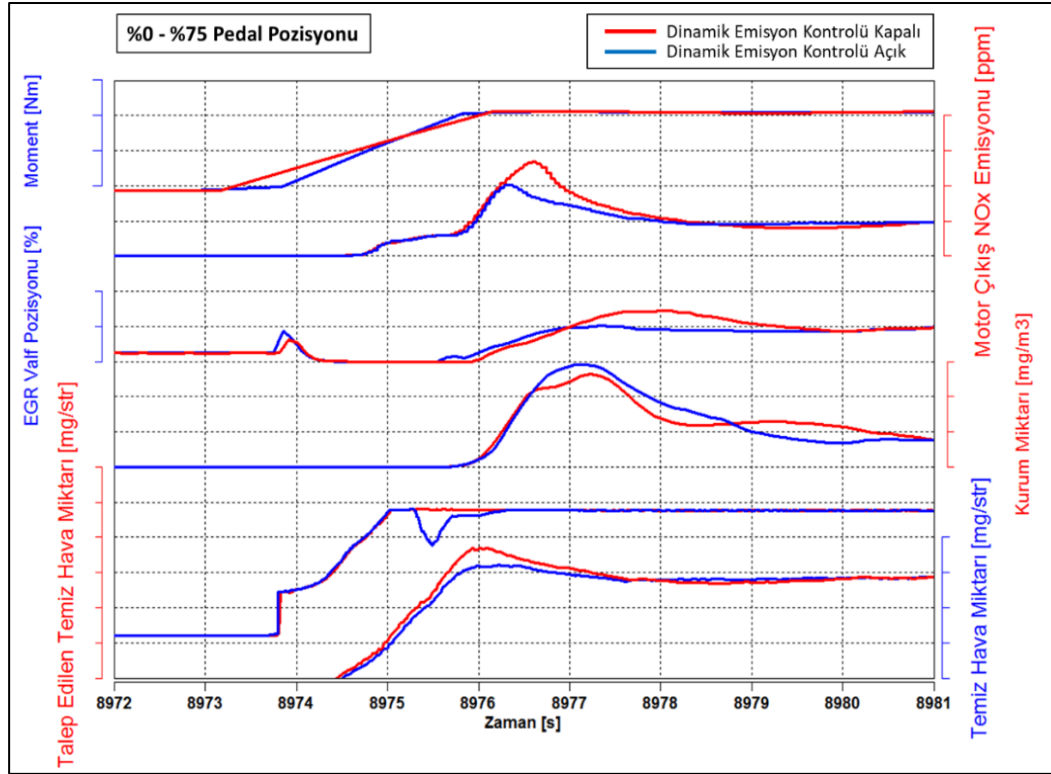
Pedal %0 konumundan, %55 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve temiz hava miktarı düşürülmüştür. Motora giren havanın azaltılmasıyla NOx emisyonunda %9 düşüş, kurumda ise %10 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.13 : %0 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.

Şekil 5.13'de görüleceği üzere, pedal %0 konumundan, %65 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum

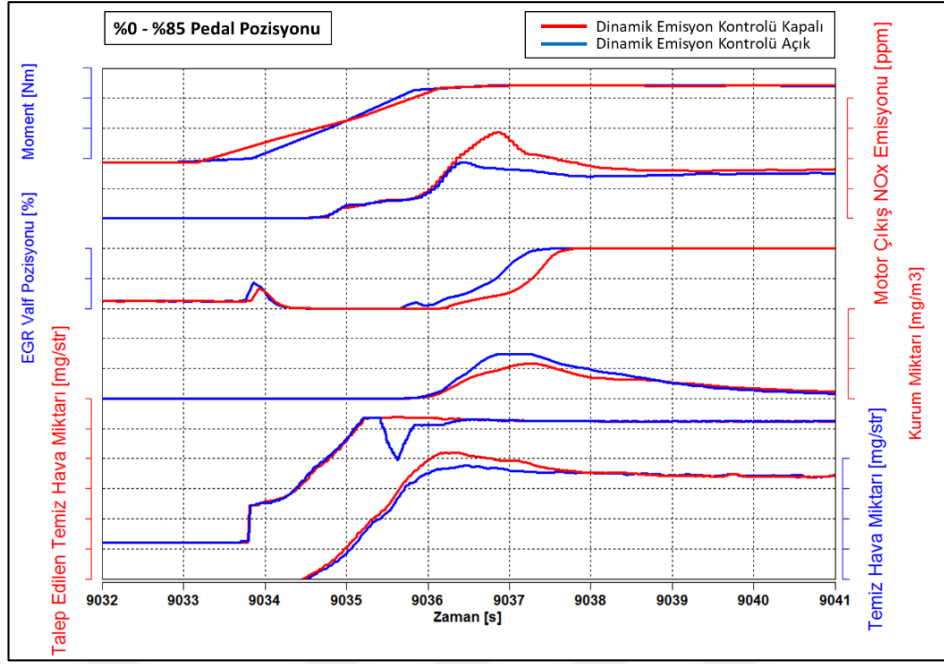
yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %16 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %5 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.14 : %0 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

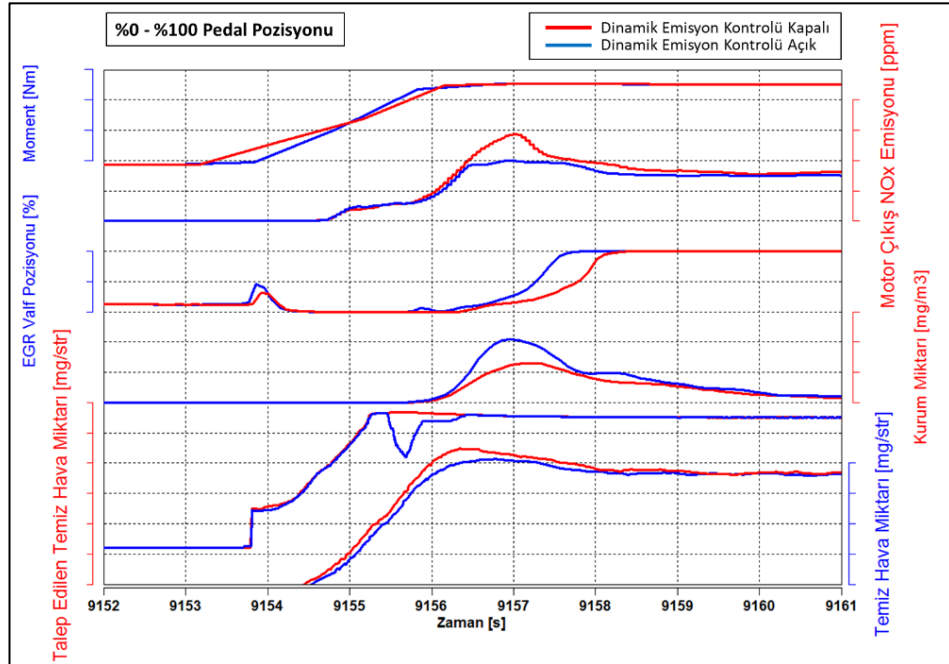
Şekil 5.14’de görüleceği üzere, pedal pozisyonu %0 konumundan, %75 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %18 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %13 artış gerçekleşmiştir.

Şekil 5.15’de görüleceği üzere, pedal pozisyonu %0 konumundan, %85 pedal konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava debisi miktarı EGR valfinin açılmasıyla beraber düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren temiz hava debisinin azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %25 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %30 artış gerçekleşmiştir.

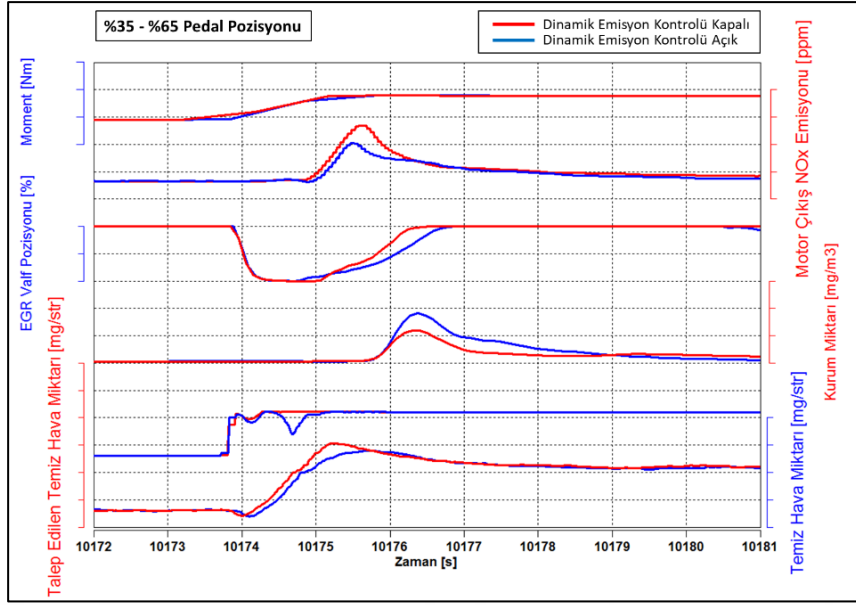


Şekil 5.15 : %0 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.

Şekil 5.16'da görüleceği üzere, pedal %0 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %18 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %34 artış gerçekleşmiştir.

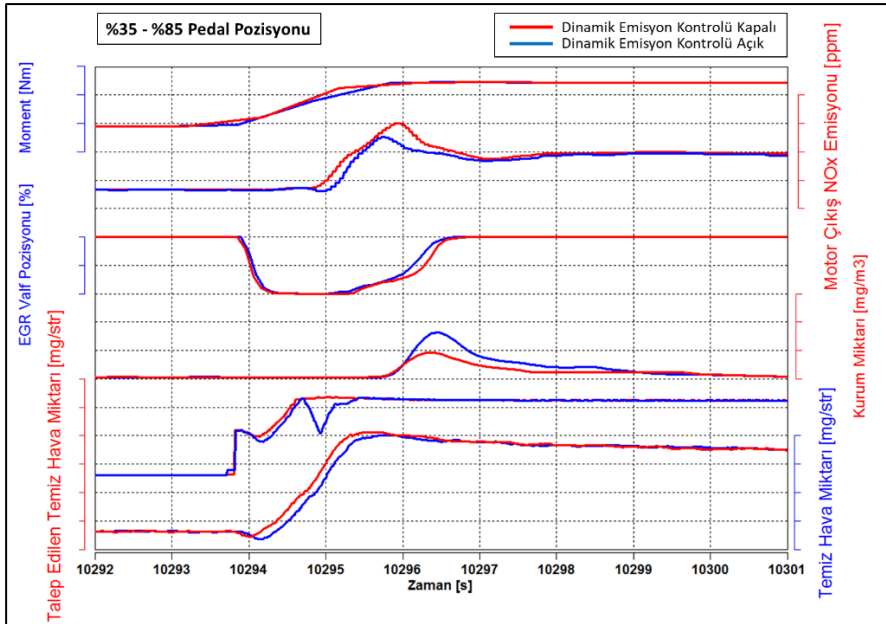


Şekil 5.16 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.



Şekil 5.17 : %35 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.

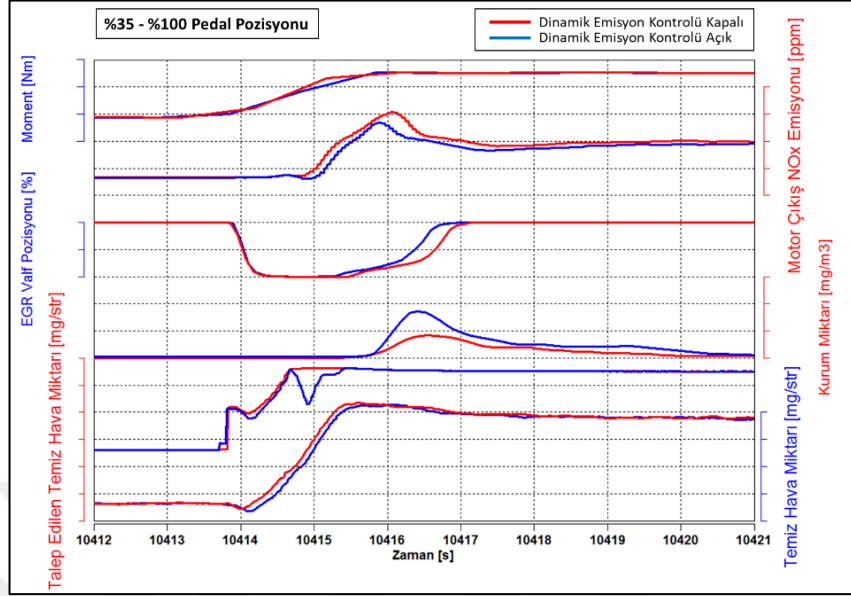
Pedal %35 konumundan, %65 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %15 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %40 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.18 : %35 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.

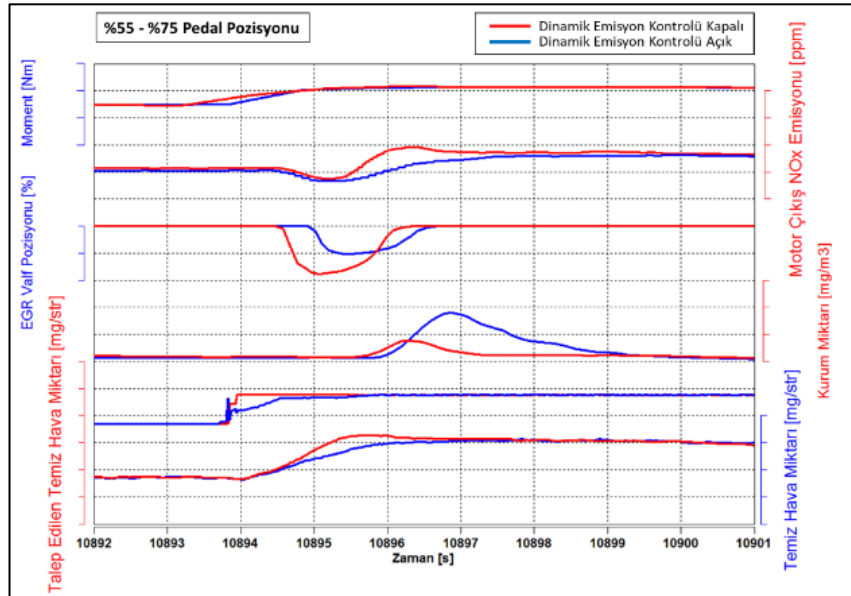
Pedal %35 konumundan, %85 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye

girmiş ve motora giren temiz hava düşürülmüştür. Temiz havanın azaltılmasına bağlı olarak Nox emisyonunda %13 düşüş, kurumda ise %39 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.19 : %35 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

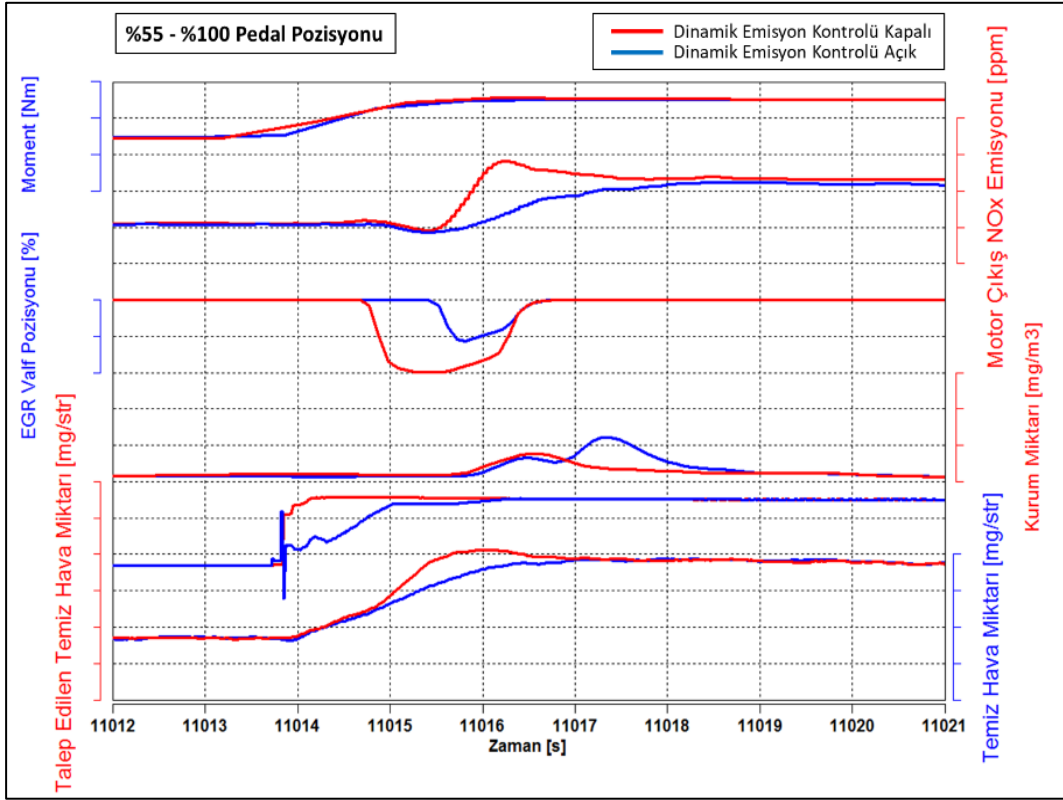
Pedal %35 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik kontrol devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Motora giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %14 düşüş, kurum emisyonunda ise %38 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.20 : %55 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %55 konumundan, %75 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye

girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %20 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %54 artış gerçekleşmiştir.

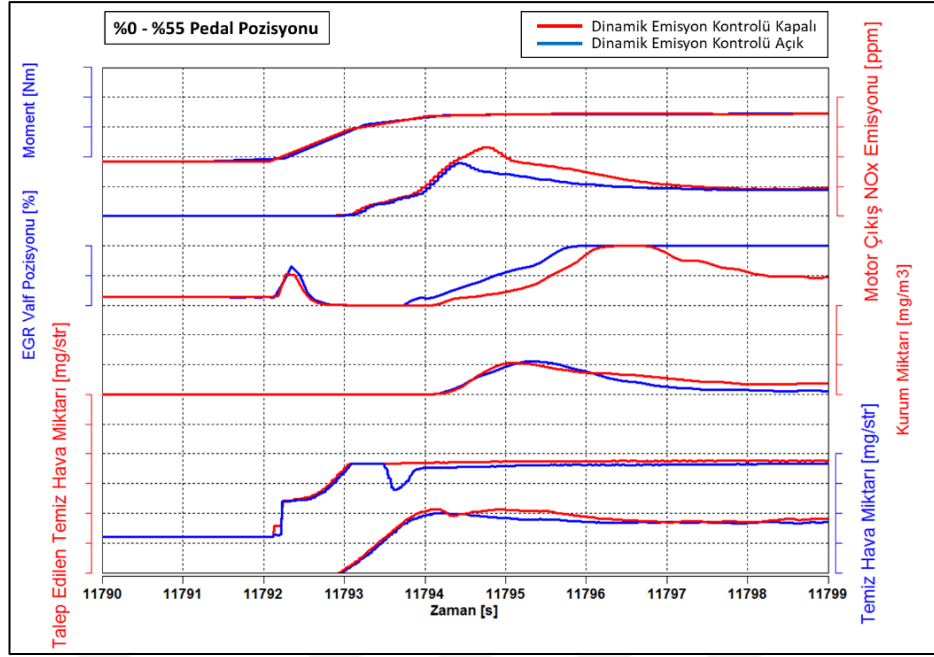


Şekil 5.21 : %55 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %55 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %24 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %23 artış gerçekleşmiştir.

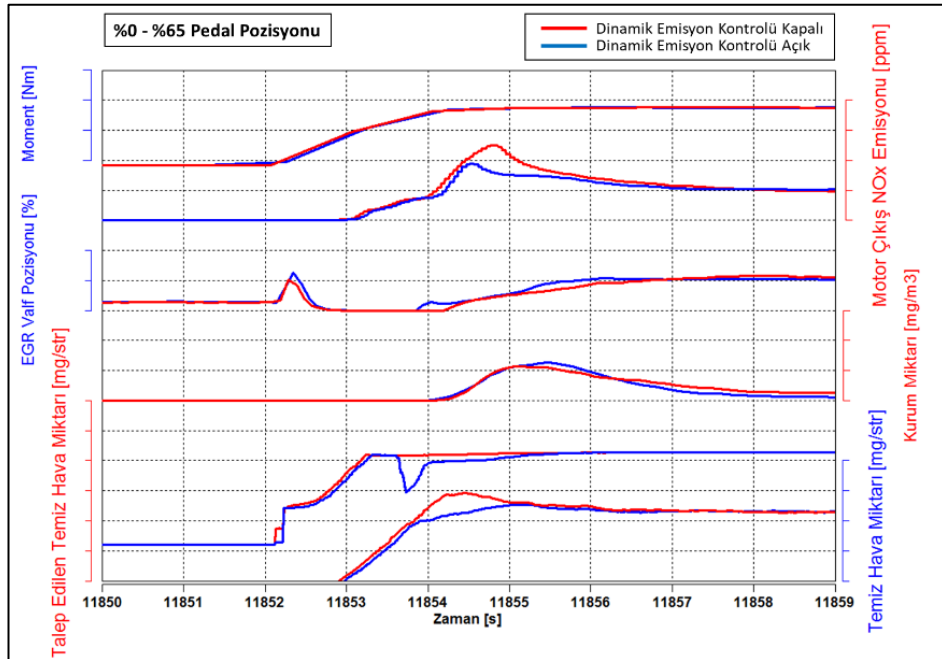
5.1.3 Motor hızının 1400d/d olduğu adım testleri

Şekil 5.22’de görüleceği üzere, pedal pozisyonu %0 konumundan, %55 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum moment miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava debisi miktarı EGR valfinin açılmasıyla beraber düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren temiz hava debisinin azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonlarında %20 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %10 artış gerçekleşmiştir.

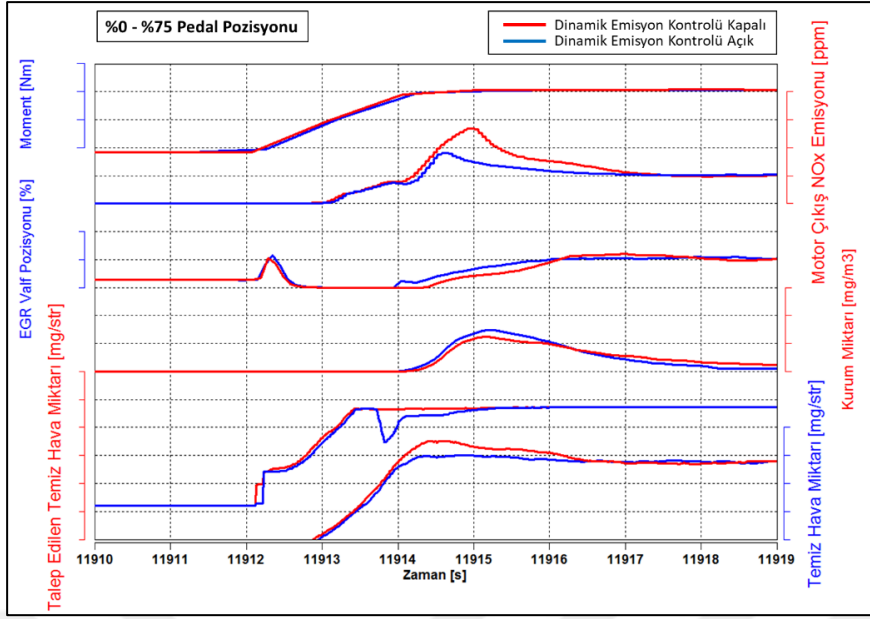


Şekil 5.22 : %0 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.

Şekil 5.23’de görüleceği üzere, pedal %0 konumundan, %65 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %18 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %15 artış gerçekleşmiştir.

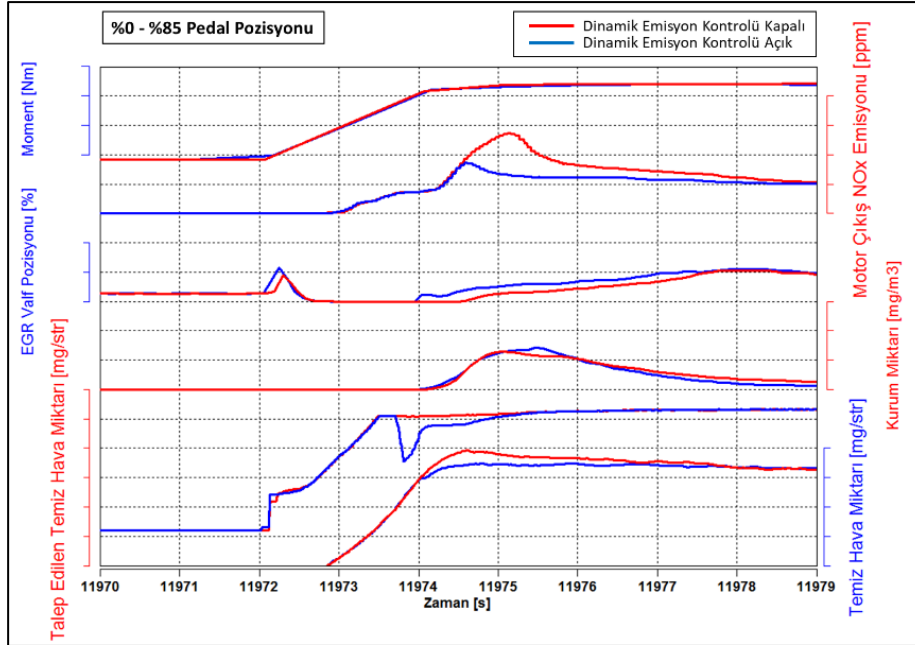


Şekil 5.23 : %0 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.



Şekil 5.24 : %0 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

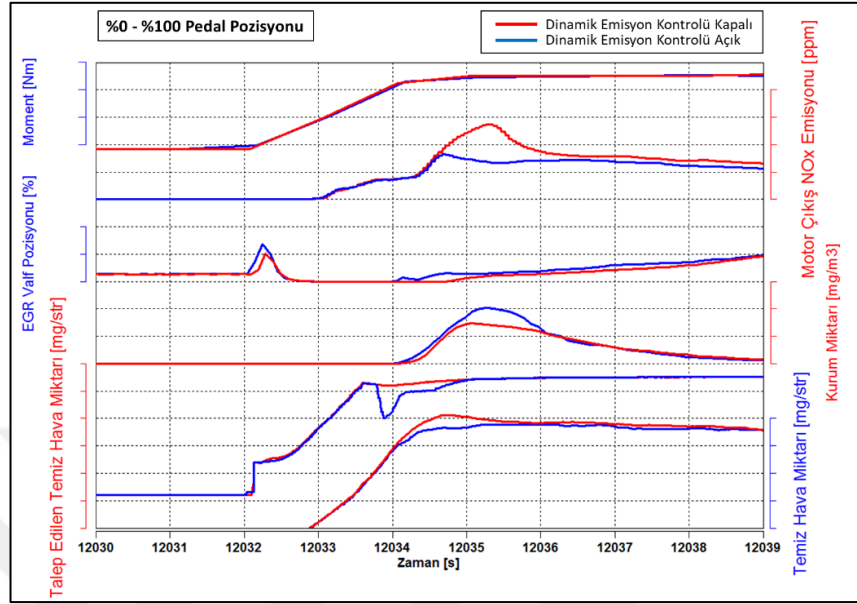
Şekil 5.24'de görüleceği üzere, pedal %0 konumundan, %75 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %28 düşüş, kurumda ise %19 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.25 : %0 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.

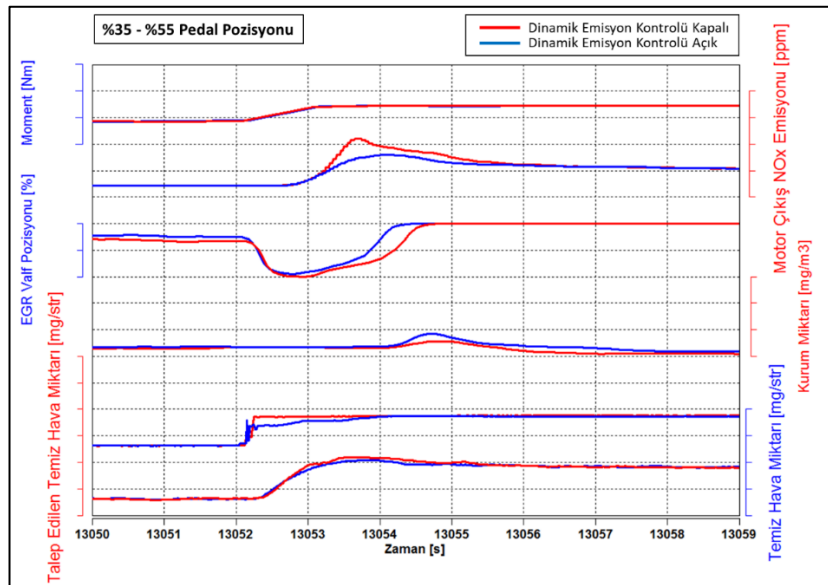
Şekil 5.25'de motor %0 konumundan, %85 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde

olduğu için devreye girmiş ve temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %25 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %18 artış gerçekleşmiştir.



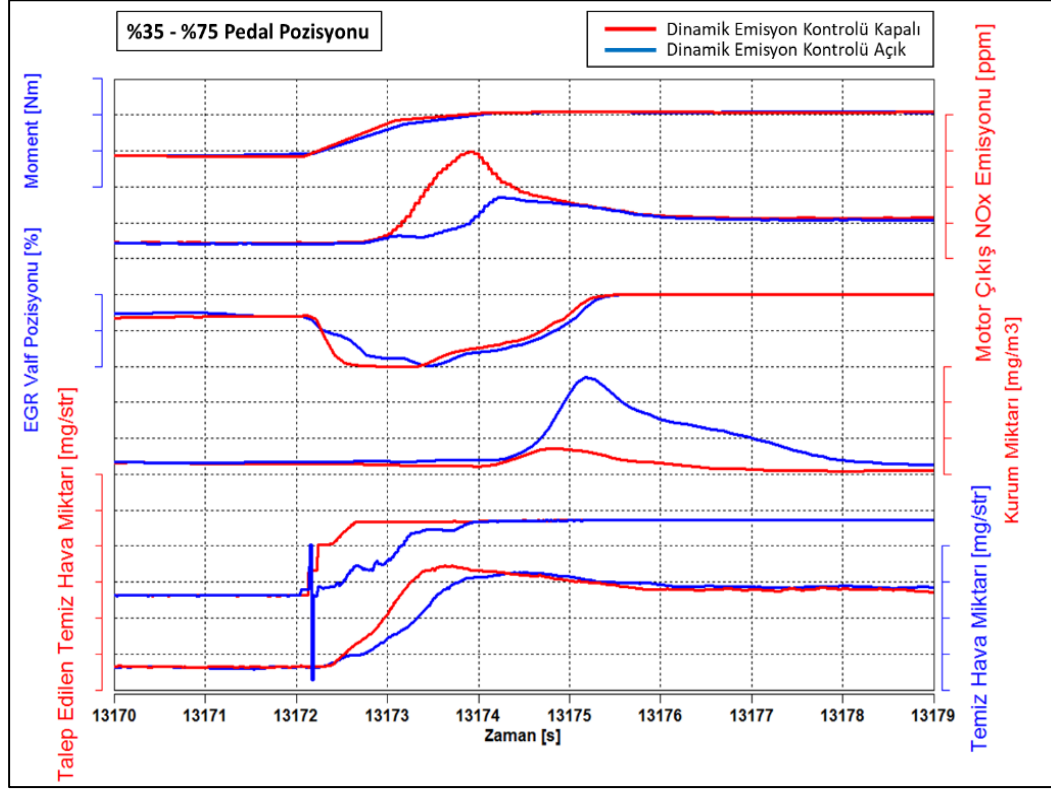
Şekil 5.26 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %0 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %24 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %37 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.27 : %35 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.

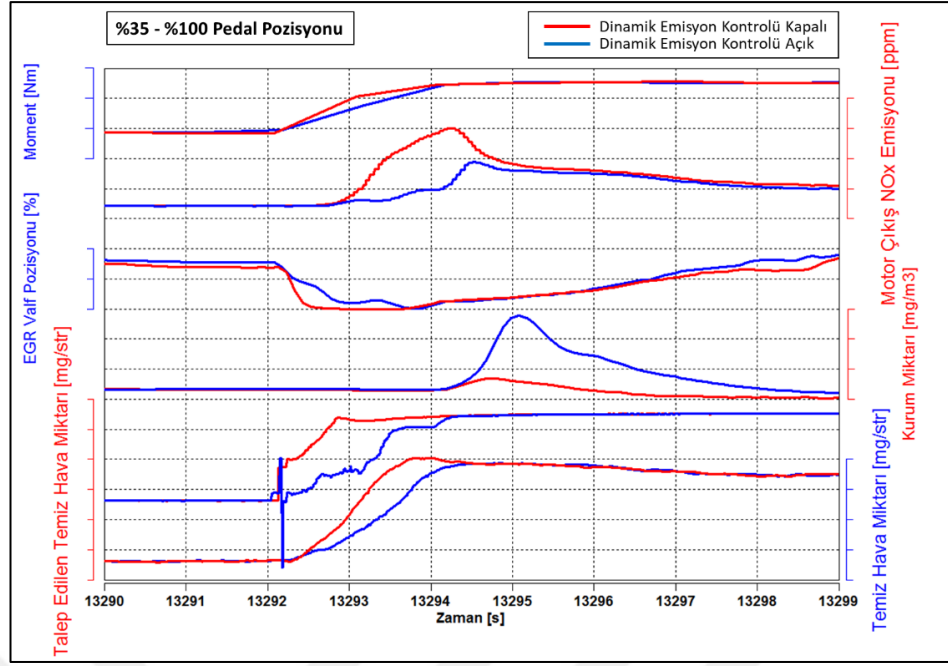
Pedal %35 konumundan, %55 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %15 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %13 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.28 : %35 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

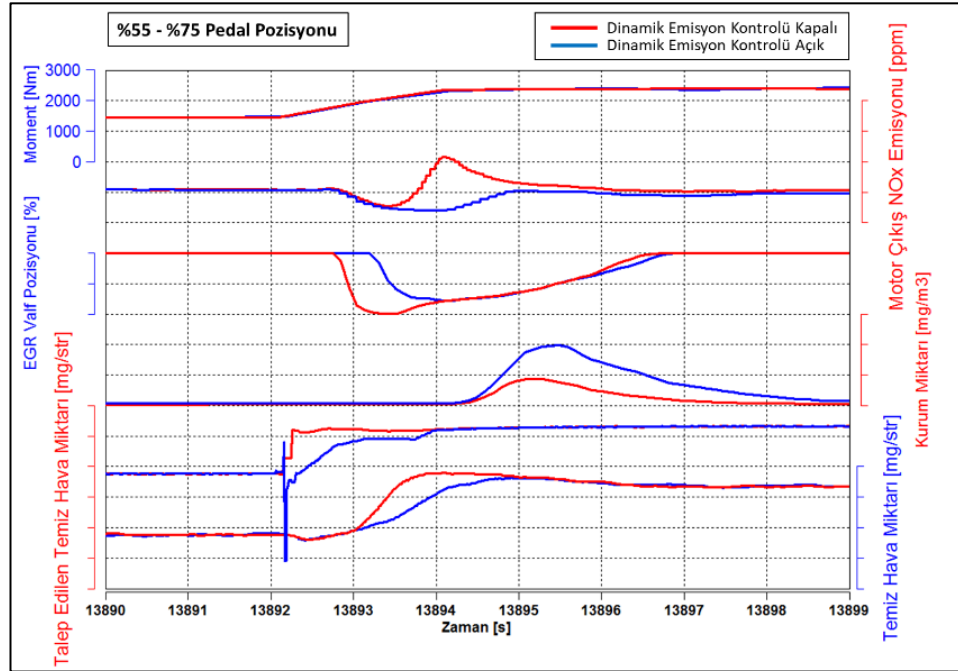
Pedal %35 konumundan, %75 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %33 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %100 artış gerçekleşmiştir.

Şekil 5.29'da görüleceği üzere, pedal %35 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava debisinin miktarı EGR valfinin açılmasıyla beraber düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %35 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %110 artış gerçekleşmiştir.

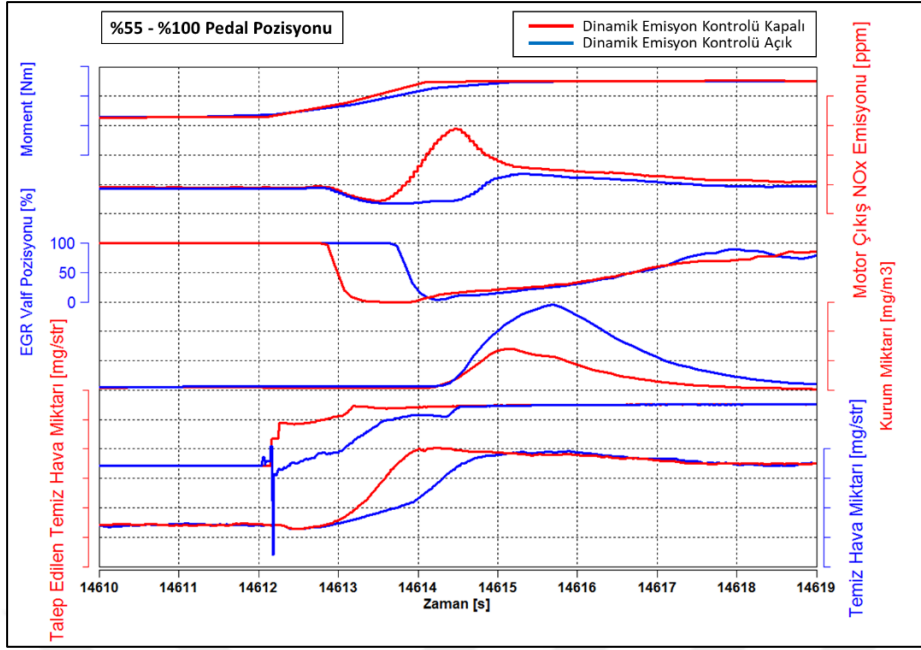


Şekil 5.29 : %35 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

Şekil 5.30'da görüleceği üzere, pedal %55 konumundan, %75 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %33 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %115 artış gerçekleşmiştir.



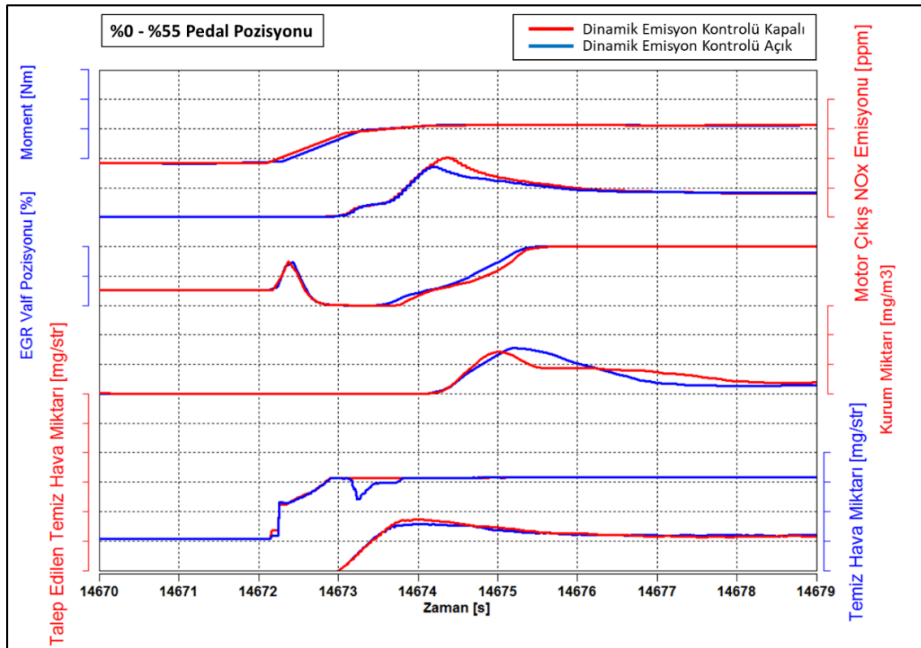
Şekil 5.30 : %55 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.



Şekil 5.31 : %55 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

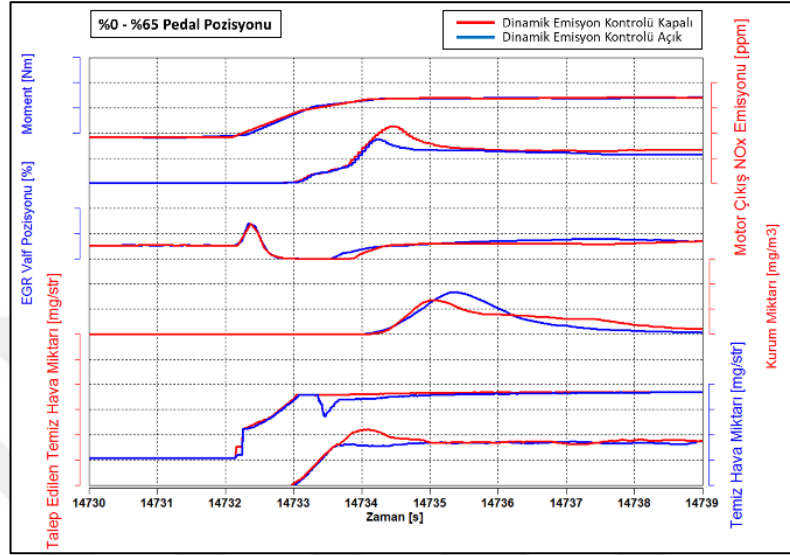
Pedal %55 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %38 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %92 artış gerçekleşmiştir.

5.1.4 Motor hızının 1600d/d olduğu adım testleri



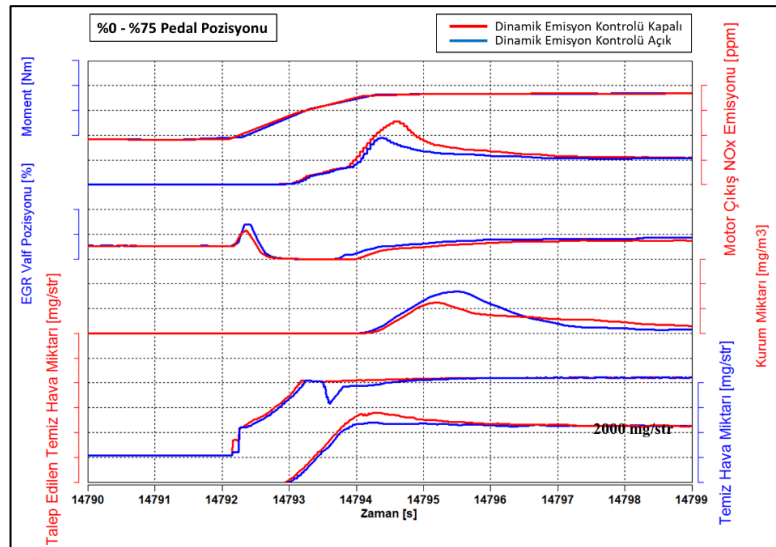
Şekil 5.32 : %0 - %55 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %0 konumundan, %55 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %11 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %12 artış gerçekleşmiştir.



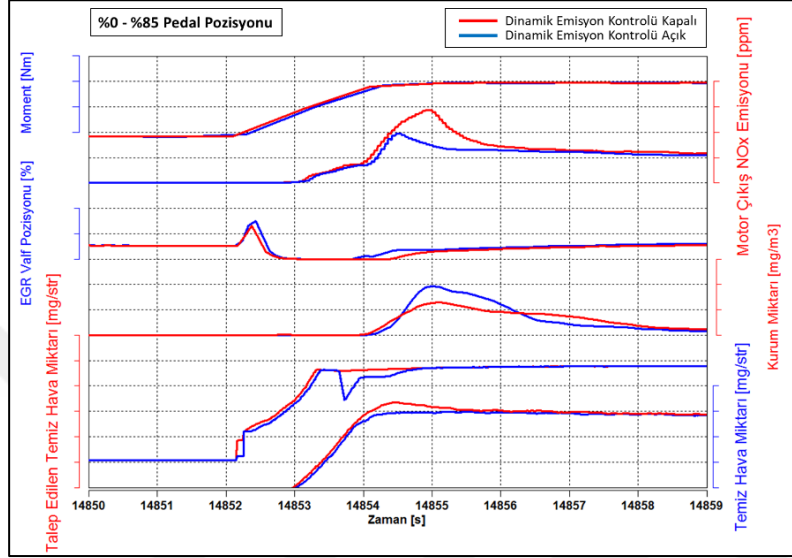
Şekil 5.33 : %0 - %65 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %0 konumundan, %65 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %14 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %9 artış gerçekleşmiştir.



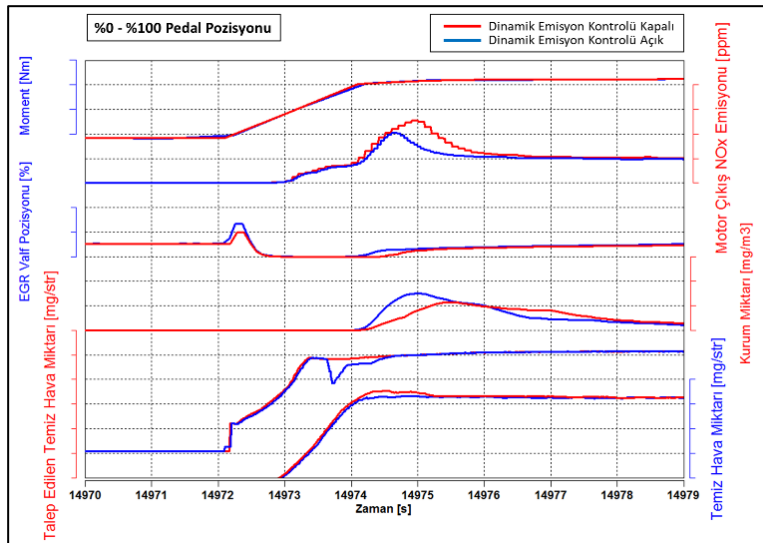
Şekil 5.34 : %0 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %0 konumundan, %75 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %18 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %22 artış gerçekleşmiştir.



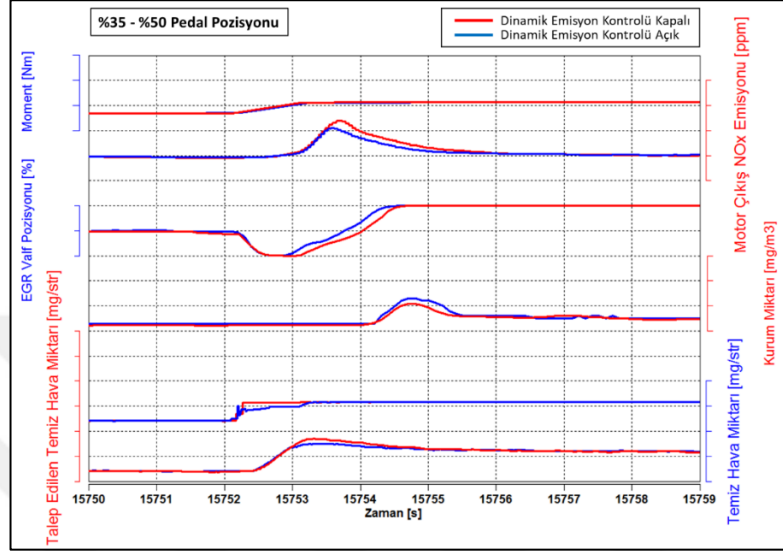
Şekil 5.35 : %0 - %85 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %0 konumundan, %85 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %22 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %29 artış gerçekleşmiştir.



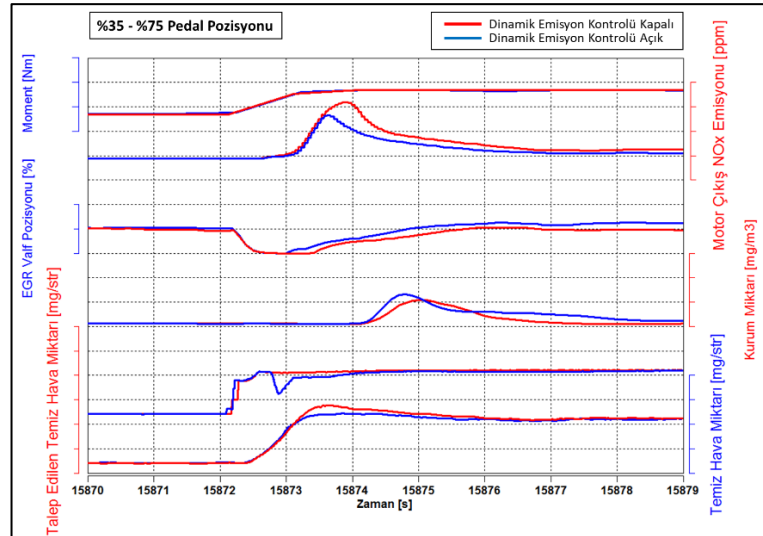
Şekil 5.36 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %0 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %18 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %23 artış gerçekleşmiştir.



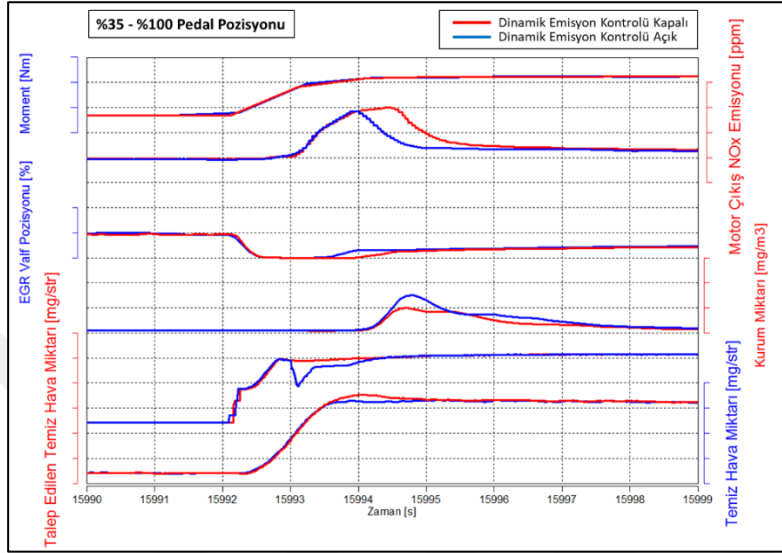
Şekil 5.37 : %35 - %50 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %35 konumundan, %50 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %9 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %18 artış gerçekleşmiştir.



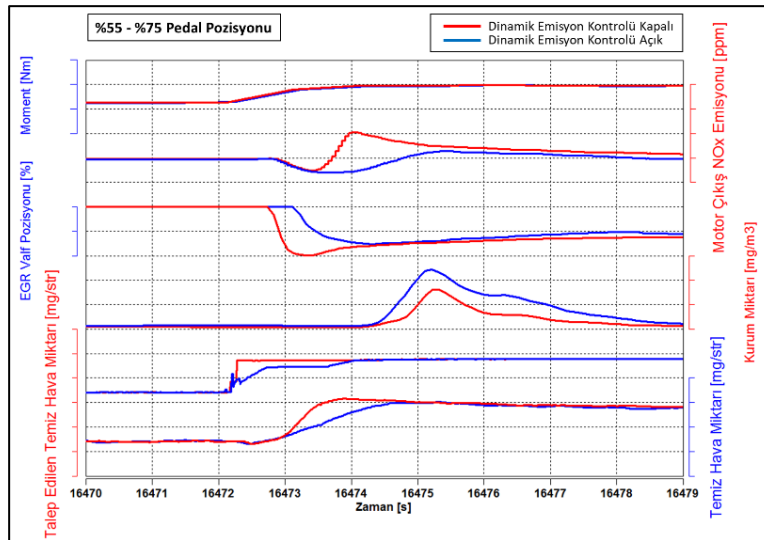
Şekil 5.38 : %35 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %35 konumundan, %75 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %17 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %25 artış gerçekleşmiştir.



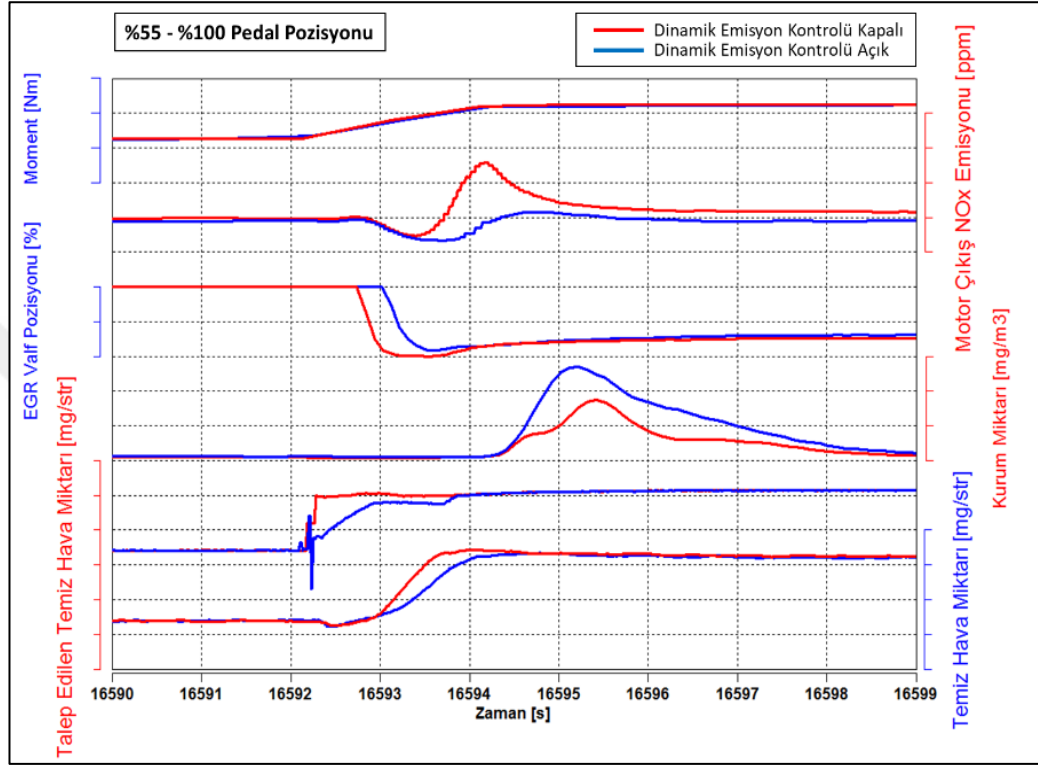
Şekil 5.39 : %35 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %35 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %13 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %12 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.40 : %55 - %75 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %55 konumundan, %75 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %30 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %70 artış gerçekleşmiştir.

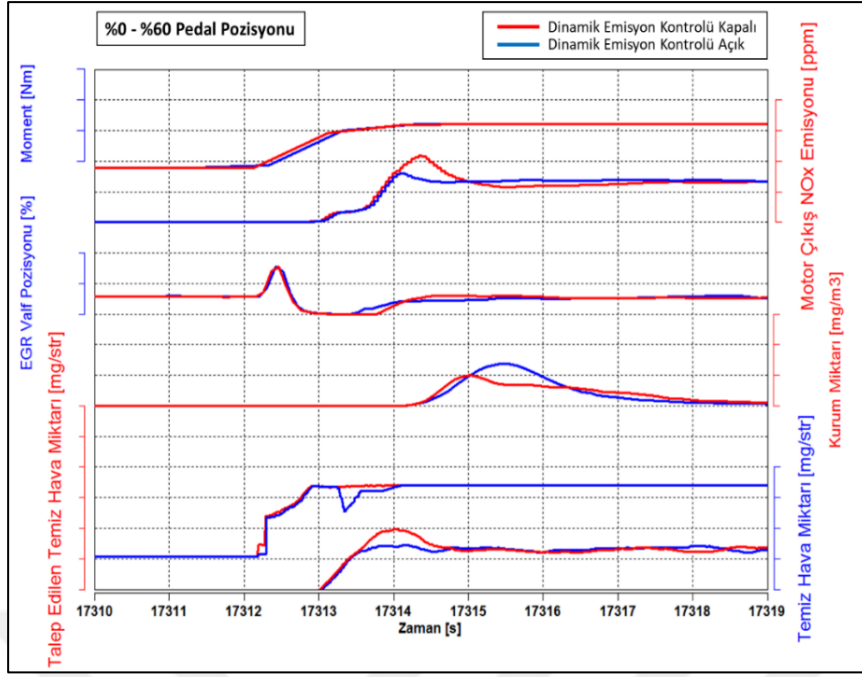


Şekil 5.41 : %55 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %55 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %35 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %60 artış gerçekleşmiştir.

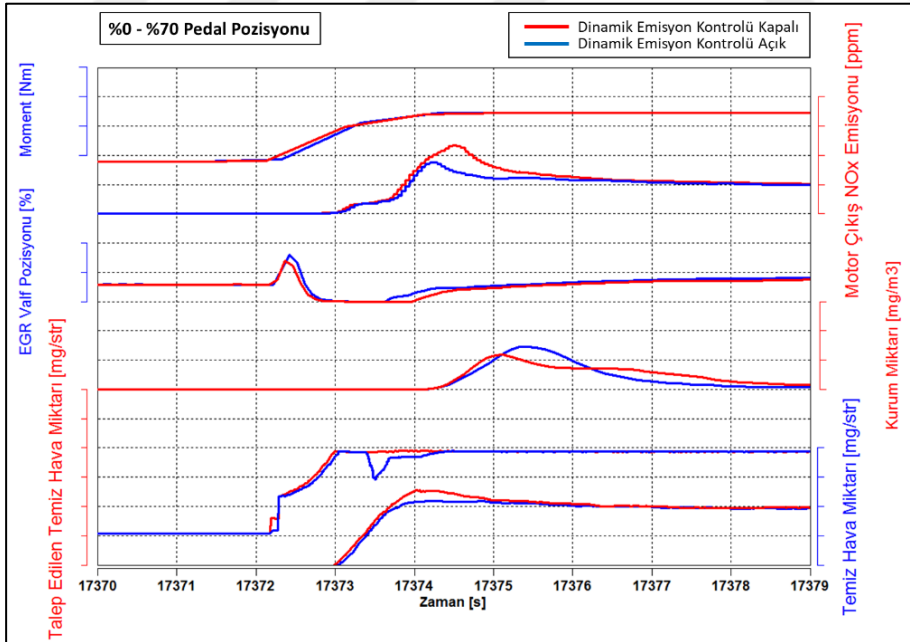
5.1.5 Motor hızının 1800d/d olduğu adım testleri

Motor hızının 1800 d/d olduğu durumda çeşitli başlangıç pedal pozisyonlarından farklı pedal pozisyonlarına giderek adım testleri yapılmıştır. Şekil 5.42’de görüleceği üzere pedal pozisyonu %0 konumundan, %60 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması talep edilen minimum moment miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava debisinin miktarı düşürülmüştür.



Şekil 5.42 : %0 - %60 pedal pozisyonunda adım testi.

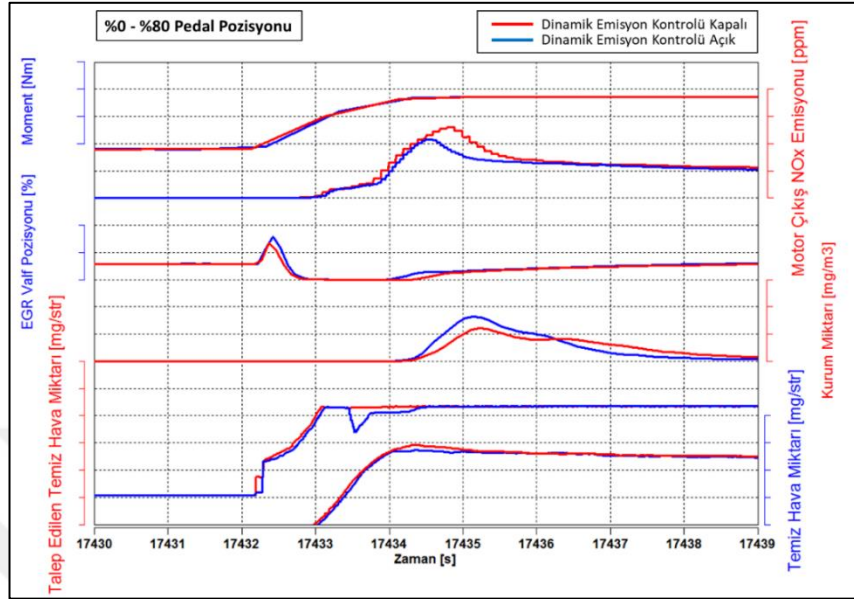
Şekil 5.42’de görüleceği üzere, geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %12 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %16 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.43 : %0 - %70 pedal pozisyonunda adım testi.

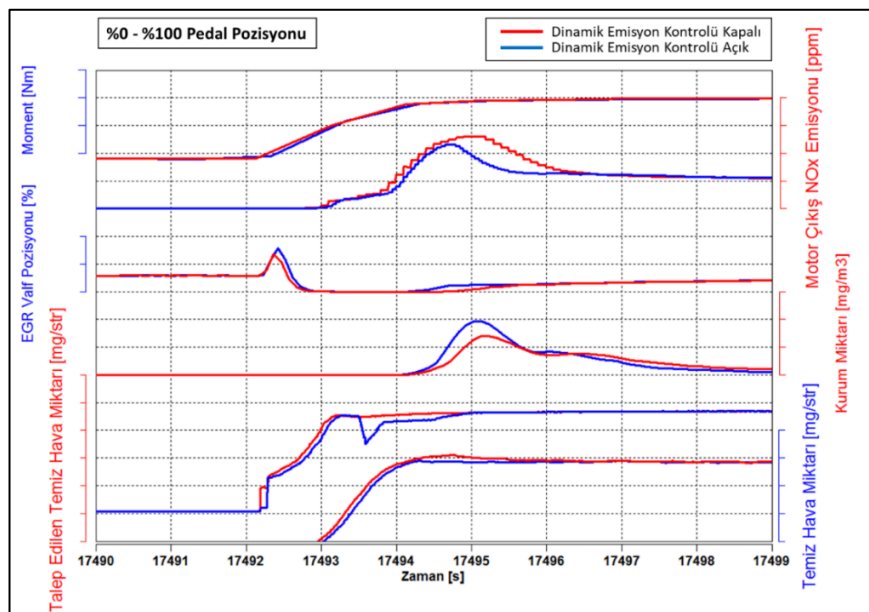
Motor hızı 1800 devir/dakika konumundayken, pedal pozisyonu %0 konumundan, %70 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren

temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %16 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %10 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.44 : %0 - %80 pedal pozisyonunda adım testi.

Pedal %0 konumundan, %80 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %15 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %20 artış gerçekleşmiştir.



Şekil 5.45 : %0 - %100 pedal pozisyonunda adım testi.

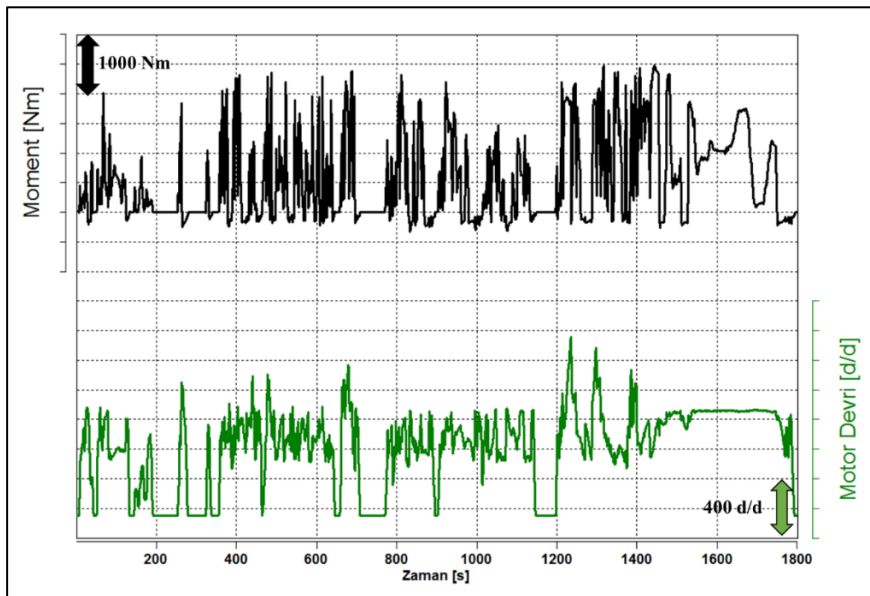
Pedal %0 konumundan, %100 konumuna götürülmüştür. Dinamik emisyon kontrolü, aktif olarak çalışması istenen minimum yük miktarının üzerinde olduğu için devreye girmiş ve motora giren temiz hava miktarı düşürülmüştür. Geçici rejim manevrasında motor giren havanın azaltılmasına bağlı olarak azot oksit emisyonunda %20 düşüş gerçekleşmiştir. Kurum emisyonunda ise %35 artış gerçekleşmiştir.

5.2 Emisyon Testleri

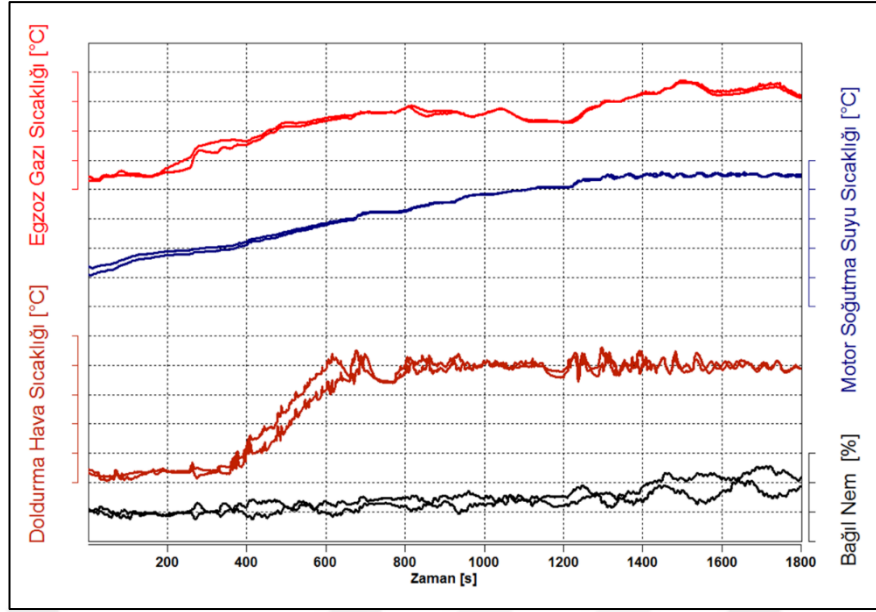
Geçici rejim manevralarında talep edilen temiz havanın azaltılmasına bağlı emisyon değişimini incelemek adına, adım testlerine ek olarak emisyon regülasyonlarınca belirlenen resmi emisyon testleri gerçekleştirilmiştir. Ağır ticari vasıtalarda motorun emisyon onayı alabilmesi için motor dinamometresinde test edilmesi gereken çeşitli emisyon çevrimleri vardır. Bu tez kapsamında incelenen davranış dinamik manevraları kapsadığından, motor dinamometresinde geçici rejim manevralarını içeren WHTC testi gerçekleştirilmiştir. Ek olarak Eu6 emisyon seviyesiyle beraber zorunlu hale gelen, aracın gerçek yol koşullarında sürülerek test edildiği PEMS testi de motor dinamometresinde gerçekleştirilmiştir.

5.2.1 WHTC

WHTC testi, şehir içi, şehir dışı ve otoban olmak üzere 3 kısımdan oluşur. Dinamik emisyon kontrolü, emisyon azaltmada daha zorlu koşul olan ve soğuk başlayan çevrimlerde emisyonu azaltabilmek adına, motor ısıtma modunda aktif edilmiştir.

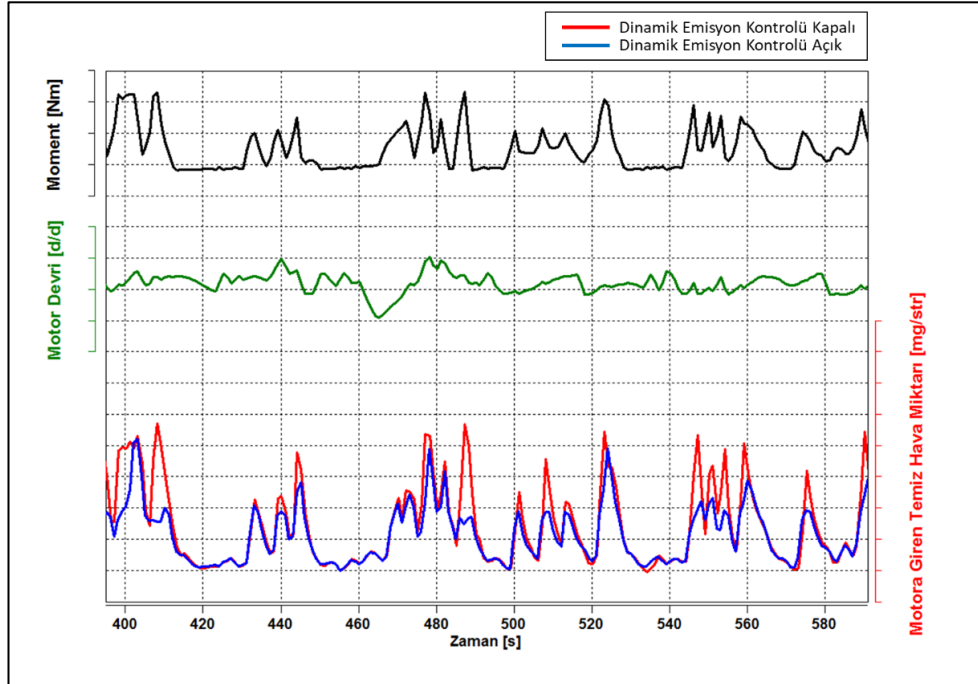


Şekil 5.46 : WHTC emisyon çevriminde motor hızı ve tork değerleri.



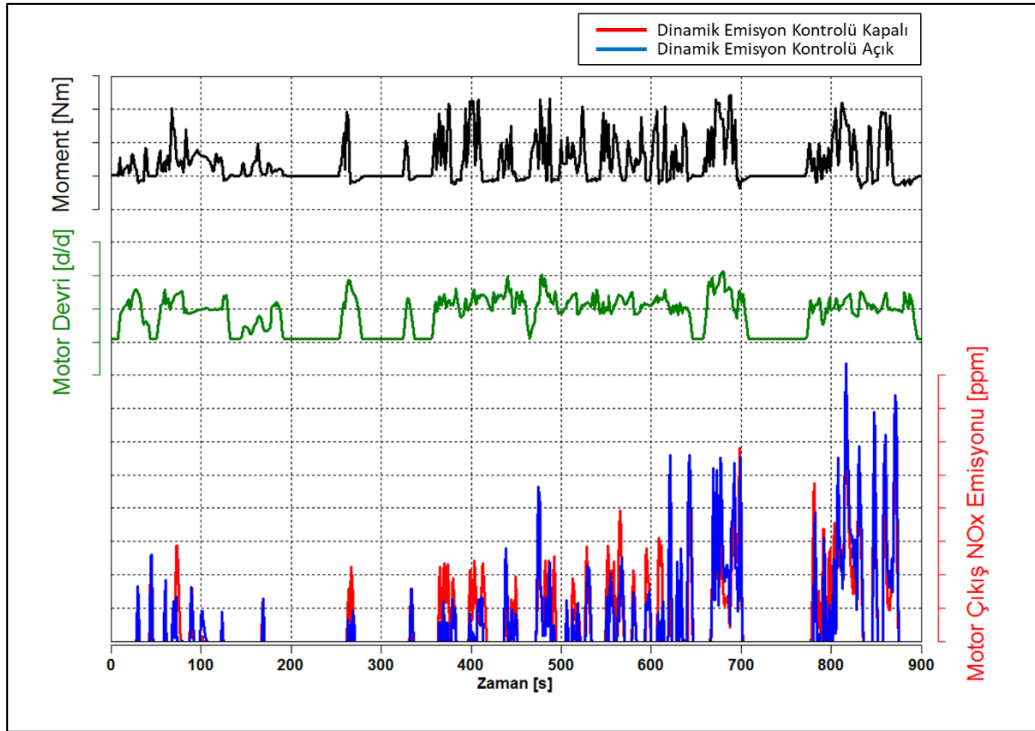
Şekil 5.47 : WHTC emisyon çevriminde başlangıç ve sınır koşulları.

WHTC testleri yapılırken, dinamik manevralarda hava kontrolünün etkisini daha iyi ayırt edebilmek adına sınır ve başlangıç koşulları eşit tutulmaya çalışılmıştır. Emisyon testleri koşarken testin koşulacağı test odası ve motor; su sıcaklığı, SCR giriş gaz sıcaklığı, nem miktarı, doldurma hava sıcaklığına dikkat edilerek koşullandırılır. Böylece testlerin aynı koşullarda başlanması sağlanır ve testler arasındaki varyasyon engellenir.



Şekil 5.48 : Dinamik manevrada motora giren temiz hava miktarı farkı.

Gerçek sürüş koşullarındaki dinamik manevraları barındıran emisyon çevrimlerinde dinamik emisyon kontrolü EGR açarak çalışmaktadır. Yukarıdaki grafikte, emisyon çevriminde değişken manevralar sonucunda motora giren havanın dinamik olarak değiştiği görülebilir. Sabit rejimli manevralarda motora giren hava miktarı, dinamik emisyon kontrolü aktif olmadığından veya aşırı doldurma basınç gecikmesinin belirlenen değerden düşük olmasından ötürü değişmezken, dinamik emisyon kontrolü fonksiyonuyla beraber dinamik manevra tespit edilip, motora giden temiz hava azaltılmaktadır.

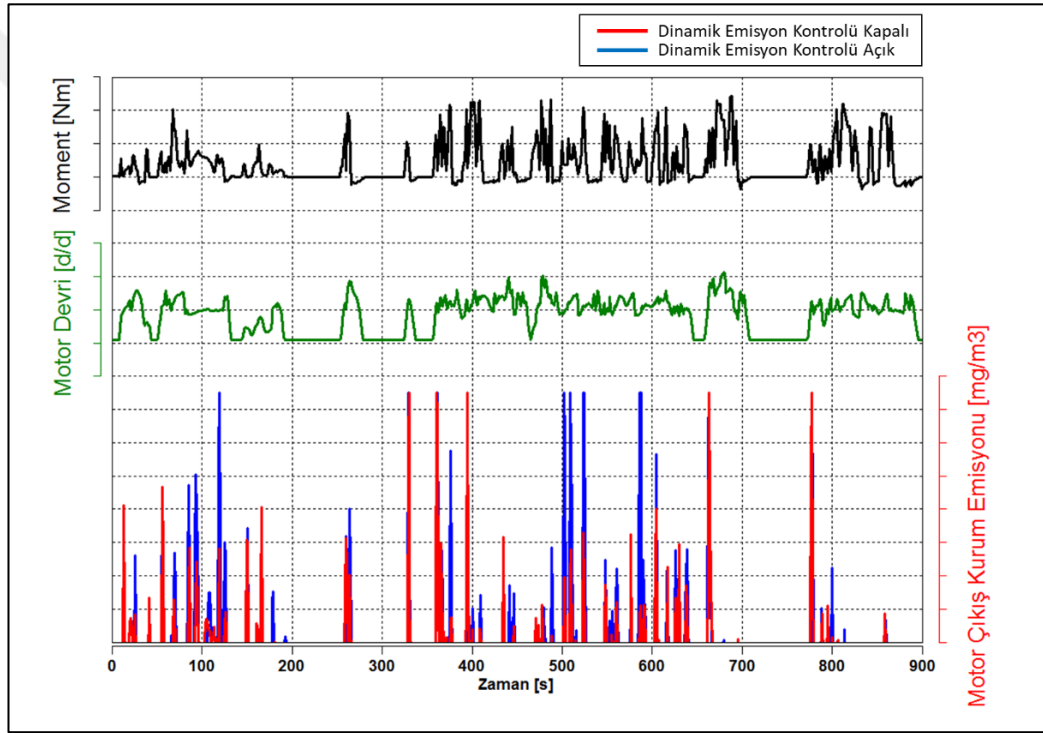


Şekil 5.49 : WHTC emisyon çevriminde motor çıkış azot oksit emisyon değerleri.

WHTC çevrimi soğuk ve sıcak motor koşullarını temsil edebilmek için soğuk ve sıcak olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Çevrimin soğuk olan bölümünün ilk yarısı şehir içi sürüş koşullarını temsil etmektedir. Test öncesi motor koşullandırılmakta ve motor teste soğuk durumdayken başlamaktadır. Testin başında egzoz sıcaklıkları ve aşırı doldurma sıcaklığı çevre şartlarıyla yaklaşık olarak aynı mertebededir. Dolayısıyla motor soğuk çevrimin başlarında, motor ısıtma modunda başlar. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, dinamik emisyon kontrolü fonksiyonu sadece soğuk motoru ısıtma modunda test edilmiştir. Motorun emisyon regülasyonları açısından yaşadığı en büyük zorluk, soğuk çalışma durumlarında egzoz sistemini ısıtmaktır. SCR sisteminin verimli bir şekilde NOx dönüşümü yapabilmesi için, katalistlerin yeterli

sıcaklık seviyelerine ulaşması gerekmektedir. Dolayısıyla egzoz arındırma sisteminin yeterli sıcaklıklara ulaşacağı zamana kadar motordan çıkan emisyonların olabildiğince azaltılması gerekmektedir. Aksi halde termal açıdan yetersiz kalan katalistler emisyon dönüşümünü sağlayamaz.

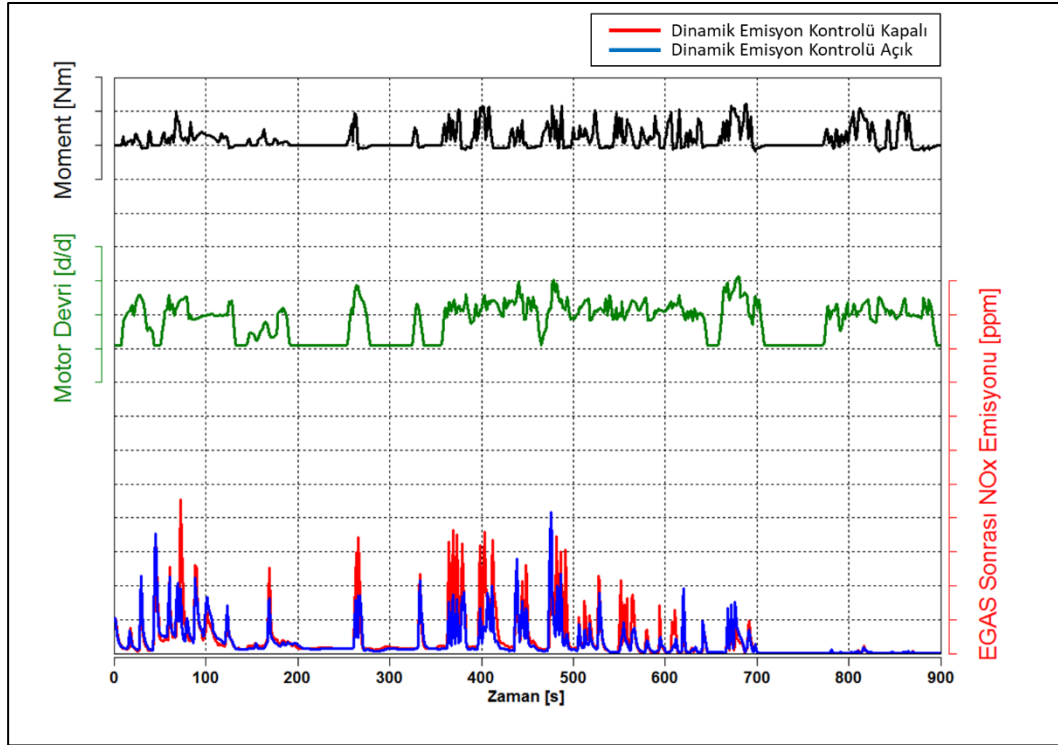
Geçici rejim manevralarının yoğun olduğu şehir içi kullanımlarında, dinamik emisyon kontrolü yardımıyla, motor çıkış azot oksit emisyonları %13 oranında azalmıştır. Emisyon çevriminin sıcak kısmında motordan çıkan emisyonlar SCR sisteminin aktif olmasıyla beraber çok yüksek verimlilikle azaltılabilirken, soğuk durumlarda bu verim düşer. Dolayısıyla WHTC soğuk çevriminde %13 oranında gerçekleşen emisyon düşümü soğuk çevrimlerde emisyon regülasyonlarını sağlamakta büyük fayda sağlar.



Şekil 5.50 : WHTC emisyon çevriminde motor çıkış kurum emisyonu değerleri.

Geçici rejim manevrasında motorun alabileceği temiz hava miktarı EGR açılarak azaltılmış, buna bağlı olarak NOx emisyonları düşürülmüştür. Yanma veriminin azot oksit emisyonlarını azaltacak yönde kötüleştirilmesiyle, hava fazlalık katsayısı düşmüş ve kurum miktarı WHTC emisyon çevrimininin soğuk bölümünde %16 oranında artmıştır. EU6 emisyon seviyesiyle beraber, egzoz arındırma sistemine eklenen dizel partikül filtresi sayesinde havaya verilen kurum emisyonları ciddi seviyelerde azaltılmıştır. Dizel partikül filtresi yardımıyla motor çıkışında gerçekleşen kurum artışının etkisi tolere edilebilmektedir. Partikül filtresi kurumu biriktirerek gerekli

zamanlarda rejenerasyon işlemi ile bu kurumu yakmaktadır. Başarılı rejenerasyon işlemi yapabilecek tam dolu olan bir partikül filtresinin biriktirebileceği kurum miktarı düşünüldüğünde, WHTC emisyon çevriminde görülen artış, azot oksit emisyonunun azalmasına karşılık tolere edilebilir seviyededir.



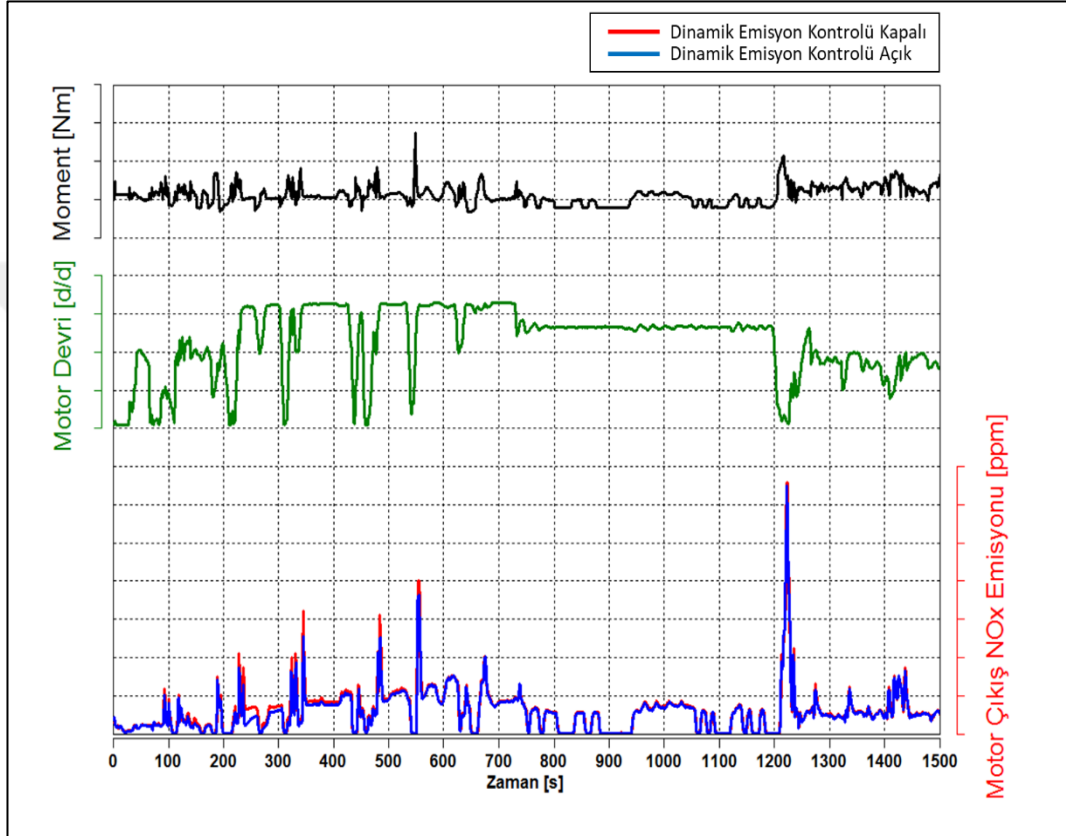
Şekil 5.51 : WHTC emisyon çevriminde egas sonrası azot oksit emisyon değerleri.

Motor çıkış emisyonlarının azalmasına bağlı olarak, EGAS (Egzoz Gazı Arındırma Sistemi) sonrası doğaya salınan NOx emisyonlarında da düşüş gerçekleşmiştir. Egzoz arındırma sisteminin soğuk olduğu durumlarda verimi düştüğü için emisyon azaltmada en önemli faktör, motor çıkışından gelen emisyon miktarını düşürmektir. Geçici rejim manevralarının yoğunlukta olduğu WHTC çevriminde motor çıkış azot oksit emisyonları azaltılarak, egzoz arındırma sistemi sonrasındaki azot oksit emisyonları da düşürülmüştür.

5.2.2 PEMS

EU6 emisyon regülasyonunun yayınlanmasıyla birlikte, motor dinamometrelerinde yapılan emisyon testlerine ek olarak, emisyon onayı alınması gereken motoru içeren araca, taşınabilir bir emisyon sisteminin bağlanmasıyla ölçüm yapılarak yol testi yapılması gerekmektedir. Motor deneylerinden farklı olarak bir araç ve bu araca bağlı emisyon ölçüm sistemleri ile veri toplanmaktadır. PEMS (Portable Emission

Measurement System) emisyon testi, diğer geçici rejim manevraları barındıran testler gibi (WHTC, ETC, vb.) çeşitli bölümlerden oluşmaktadır. WHTC emisyon testinde olduğu gibi, deneye başlamadan önce motor ve EGAS soğuk olmalıdır. Motor soğutma suyu ve EGAS belirli bir sıcaklığa ulaşana kadar araç motor ısıtma modunda çalışacaktır. EGAS sisteminin soğuk olmasından dolayı verimi düşecek ve motor çıkışındaki azot oksit emisyonlarını azaltmak kritik bir önem taşıyacaktır.



Şekil 5.52 : PEMS testinde motor çıkış azot oksit emisyon değerleri.

Dinamik emisyon kontrolünün testlerini yaparken, tekrarlı araç testleri yapmak cihaz bakımı ve maliyetler açısından oldukça zorlayıcıdır. Dolayısıyla, daha önceden emisyon otoritesi hakemi eşliğinde test edilmiş bir kamyonun PEMS çevrimi boyunca motor hızı ve motor yükü verisi kaydedilmiştir. Daha sonrasında bu veriler yardımıyla PEMS çevrimi çıkartılmış ve motor dinamometresinde PEMS testi yapılan araçtaki motor hızı ve yükü kullanılarak çevrim oluşturulmuştur. Bu çevrim sayesinde araç testine ihtiyaç kalmadan, kontrollü motor dinamometresi ortamında dinamik emisyon kontrolü açık ve kapalı olacak şekilde tekrarlı deneyler yapılmıştır.

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, motorun ve EGAS'nin soğuk olduğu durumlardaki emisyonları en aza indirebilmek adına dinamik emisyon kontrol sistemi

aktif hale getirilerek PEMS çevriminde soğuk olan bölümden motor suyu sıcaklığının ısındığı bölüme kadar çıkan azot oksit emisyonlarının azaltılması amaçlanmıştır. Motorun soğuk olan bölümlerindeki azot oksit emisyonlarını azaltmak, motorun ve katalistlerin sıcak olduğu durumdan daha önemlidir. Dinamik manevralarda talep edilen temiz hava miktarının manipölasyonu ile, PEMS testinde motor çıkış azot-oksit emisyonlarında %6 düşüş elde edilmiştir.



6. SONUÇLAR

Gün geçtikçe otomotiv sektörünün büyümesi ve içten yanmalı motor kullanımına bağlı olarak emisyon regülasyonları sıkışmış ve otomotiv üreticilerini teknolojik anlamda gelişime yönlendirmiştir. Hem emisyon regülasyonlarını sağlamak, hem de sürdürülebilir maliyetlerle müşteri beklentilerini karşılayacak ürün ortaya koymak asıl amaç haline gelmiştir. Bununla beraber, bu beklentileri karşılayacak mühendislik eforu, test maliyetlerinin ve teste harcanan sürelerin artması anlamına gelmektedir. Emisyon regülasyonlarına uyup daha düşük zaman ve maliyetlerle üretim yapmak üreticileri bilgisayar destekli test ve modelleme konularına yönlendirmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar sayıları yüzlere varacak olan araç test maliyetlerini azaltıp, model ortamında kalibrasyon yapmayı ve bunu araç üzerinde minimum sayıda test ederek emisyonda iyileştirmeler yapmayı mümkün kılmaktadır.

Motorun dinamik manevralardaki davranışını anlamak emisyon regülasyonları açısından çok önemlidir. Motor kontrolü geliştirme sırasında aynı motor devri ve yükünde durmak şeklinde özetlenebilecek sabit rejimli manevralar, dinamik manevralara göre geliştirmesi ve yanma parametreleri açısından anlaşılması ve yorumlanması daha kolay manevralardır. Gerek motordaki sabit manevralarda parçaların sıcaklık ve basınç rejiminin oturması, gerek değişken olmayan motor hızı ve yükünün lineer olmayan ve tahmin edilemez seviyelerde davranışlar gerektirmemesi sebebiyle dinamik manevralar emisyon ve kontrol yöntemleri açısından daha karmaşık yapıdadır.

Motorun çalışacağı yanma parametreleri (yakıt miktarı, enjeksiyon stratejisi, enjeksiyon zamanlaması, yakıt ray basıncı, temiz hava talebi, aşırı doldurma basıncı) motor kontrol ünitesi yardımıyla sabit motor hızı ve yükünde kalibre edilerek belirlenir. Dinamik manevralarda ise bu sabit noktalara göre interpolasyon yapılarak motorun çalışması istenen yanma parametreleri motor kontrol ünitesi tarafından seçilir. Bunun sebebi, motor dinamometresinde sabit noktalar üzerinden çalışılan bu yanma parametreleri, doğal olarak dinamik manevralarda sabit olarak test edilemeyeceğinden ötürü, yanma parametrelerinin değerleri sabit motor hızı ve

yükünde belirlenir. Dolayısıyla dinamik noktaların yanma parametrelerine vereceği tepkiler daha belirsiz olmaktadır. Bu sebeple dinamik manevralar emisyon açısından daha zorludur. Bu tez kapsamında motorun dinamik manevralarda sabit noktalar üzerinden talep ettiği temiz hava debisi manipüle edilerek motor emisyonlarına etkisi incelenmiştir.

Dinamik manevralardaki hava debisi talebinin değiştirilmesinin etkisini daha iyi anlayabilmek ve daha düşük zaman ve maliyetler ile deney yapabilmek adına Matlab-Simulink ortamında black-box motor hava alma modeli kurulmuştur. Bu model yardımıyla motorun normalde aldığı hava miktarı manipüle edilerek, EGR açarak çalışması için gerekli katsayılar hesaplanarak motor kontrol ünitesine beslenmiştir. Çalışma kapsamında yapılmış olan emisyon iyileştirmesinin etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi adına step test adı verilen adım testi kurgulanmıştır. Beş farklı motor devrinde, çeşitli başlangıç pedal pozisyonlarından farklı pedal pozisyonlarına gidecek şekilde test matrisi tasarlanmıştır. Buradaki amaç hava talebinin etkisini direkt olarak görebilmek için pedal pozisyonunu çok hızlı sürelerde sıfırdan farklı pozisyonlara götürerek dinamik manevraları simule etmektir. Modeli korele edebilmek amacıyla dinamik manevrada talep edilen hava debisinin değiştirilmediği durum test edilmiş olup, bu hava debisi çeşitli katsayılarla çarpılarak motorun dinamik manevralarda EGR açması sağlanmıştır. Daha sonrasında EGR açılmayan dinamik manevralar ile EGR akışının sağlandığı manevralar arasındaki azot oksit ve kurum emisyonları incelenmiştir.

Dinamik manevralarda emisyon etkisini görebilmek için adım testlerine ek olarak, EU6 emisyon regülasyonuna ait dinamik manevralardan oluşan WHTC ve gerçek sürüş koşullarını temsil etmek için oluşturulmuş PEMS testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada özellikle motorun soğuk çalışma bölümünde azot oksit emisyonlarında düşüş sağlanmıştır. Gerçek sürüş koşullarını yansıtan regülatif emisyon testlerinin özellikle soğuk çalışma koşullarında gerçekleştirilen bölümlerinde emisyon açısından fayda sağlanmıştır.

Yapılan çalışmalarda dinamik manevralarda motorun kontrol ünitesi üzerinden talep ettiği temiz hava manipüle edilerek azot oksit emisyonlarında iyileşme sağlanmıştır. Daha fazla sayıda test koşullarıyla model çıktıları iyileştirilebilir. Ancak minimum test sayısı ile emisyon önleyici kontrol stratejisi üretmek de mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] **Xin, Q.** (2011). Diesel engine system design. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- [2] **Criens, C.** (2014). Air-path control of clean diesel engines : For disturbance rejection on nox, pm and fuel efficiency.
- [3] **Park, Y., Min, K., Chung, J., & Sunwoo, M.** (2015). Control of the air system of a diesel engine using the intake oxygen concentration and the manifold absolute pressure with nitrogen oxide feedback. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*
- [4] **Kim, S., Jin, H., & Choi, S.** (2014). Pressure and flow based control of a turbocharged diesel engine AIR-PATH system equipped With Dual-loop EGR And vgt. 2014 American Control Conference. doi:10.1109/acc.2014.6858964
- [5] **Semakula M., Inambao F.** (2017). The Effects of Exhaust Gas Recirculation on the Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine – A Critical Review. *International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 23*
- [6] **Alriksson, M., Rente, T., & Denbratt, I.** (2005). Low soot, low NOx in a heavy duty diesel engine using high levels of EGR. SAE paper 2005-01-3836
- [7] **Reifarth, S., & Angstrom, H.** (2009). Transient egr in a long-route and short-route egr-system. *ASME 2009 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference.*
- [8] **Reifarth S.,** (2010). EGR-Systems for Diesel Engines, *KTH CICERO Department of Machine Design Royal Institute of Technology, TRITA –MMK 2010:01 ISSN 1400-1179 ISRN*
- [9] **Lapuerta, M., Ramos, Á, Fernández-Rodríguez, D., & González-García, I.** (2018). High-pressure versus low-pressure exhaust gas recirculation in a euro 6 diesel engine with lean-nox trap: Effectiveness to reduce nox emissions. *International Journal of Engine Research*, 20(1), 155-163.

- [10] **D'Ambrosio, S., Ferrari, A., & Spessa, E.** (2012). Analysis of the egr system performance in modern diesel engines. *ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference*.
- [11] **Bermúdez, V., Lujan, J. M., Pla, B., & Linares, W. G.** (2011). Effects of low pressure exhaust gas recirculation on regulated and unregulated gaseous emissions during nedc in a light-duty diesel engine. *Energy*, 36(9).
- [12] **Heuwerker, D., Glewen, W., Meyer, C., Foster, D. E., Andrie, M., & Krieger, R.** (2011). Effects of low pressure egr on transient air system performance and emissions for low temperature diesel combustion. *SAE Technical Paper*.
- [13] **F. Millo, C. Ferraro, M. Gianoglio Bernardi, S. Barbero and P. Pasero.** (2009). Experimental and Computational Analysis of Different EGR Systems for a Common Rail Passenger Car Diesel Engine. *SAE Technical Paper 2009-01-0672*.
- [14] **G. Lim, Y. Choi, C. Park and J. Park.** (2011). Effects of HPL and LPL EGR Gas Mixed Supply on Combustion and Emissions in Automotive Diesel Engine. *SAE Technical Paper 2011-01-1831*.
- [15] **S. Reifarth and H.-E. Ångström.** (2010). Transient EGR in a High-Speed DI Diesel Engine for a set of different EGR-routings. *SAE Int. J. Engines*, vol. 3(1).
- [16] **J. M. Desantes, J. M. Luján, B. Pla and J. A. Soler.** (2013). On the combination of high-pressure and low-pressure exhaust gas recirculation loops for improved fuel economy and reduced emissions in high-speed direct-injection engines. *International Journal of Engine Research*, vol.14.
- [17] **A. Pfeifer, M. Smeets, H. Herrmann, D. Tomazic, F. Richert and A. Schlosser.,** (2002). A new approach to boost pressure and EGR rate control development for HD truck engines with VGT. *SAE Technical Paper 2002-01-0964*.
- [18] **Url-1** <<http://www.torvergata-karting.it/article/articleview/76/1/9/>>, erişim tarihi: 20.02.2021
- [19] **Heywood, J., (1988).** Internal Combustion Engine Fundamentals. *McGraw-Hill Book Co., New York*.
- [20] **Pulkrabek, W. W.** (2004). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. *Unid States of America: Prentice Hall*.

- [21] **Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A.** (2016). *Internal combustion engines: Applied thermosciences*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- [22] **Nelson-Gruel, D., Chamaillard, Y., Charlet, A., & Colin, G.** (2014). Robust control applied to minimize nox emissions. *2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*.
- [23] **Dhal, G. C., Mohan, D., & Prasad, R.** (2017). Preparation and application of effective different catalysts for simultaneous control of diesel soot and Nox EMISSIONS: An overview. *Catalysis Science & Technology*, 7(9), 1803-1825.
- [24] **Shah, S. R., Maiboom, A., Tauzia, X., & Hetet, J.** (2009). Experimental study Of Inlet manifold water injection on a common RAIL HSDI automobile diesel engine, compared to EGR with respect to PM and Nox emissions and specific consumption. *SAE Technical Paper Series*.
- [25] **Semakula M., Inambao F.** (2018). The Formation, Effects and Control of Oxides of Nitrogen in Diesel Engines. *International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 6*.
- [26] **Sindhu, R., Amba Prasad Rao, G., & Madhu Murthy, K.** (2018). Effective reduction of nox emissions from diesel engine using split injections. *Alexandria Engineering Journal*, 57(3).
- [27] **Rößler, M., Velji, A., Janzer, C., Koch, T., & Olzmann, M.** (2017). Formation of engine internal no2: Measures to control the no2/nox ratio for enhanced exhaust after treatment. *SAE International Journal of Engines*, 10(4).
- [28] **Url-2** <<https://www.transportpolicy.net/standard/eu-heavy-duty-emissions>>, erişim tarihi: 25.02.2021
- [29] **Url-3** <<https://dieselnet.com/standards/eu/hd.php>>, erişim tarihi: 25.02.2021
- [30] **Url-4** <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6VI_briefing_jun2016.pdf>, erişim tarihi: 25.02.2021
- [31] **Url-5** <<https://www.avl.com/-/avl-fuel-mass-flow-meter-and-fuel-temperature-control>> , erişim tarihi: 26.02.2021
- [32] **Url-6** < https://www.continental-automotive.com/getattachment/f5cbadd-7b12-4d57-849d-4c95f2d8a2cb/POWERTRAIN_Product_Booklet_Final_2017.pdf> , erişim tarihi: 26.02.2021

- [33] **Url-7** < <https://new.abb.com/products/measurement-products/flow/thermal-mass-flowmeters/sensyflow-fmt500-ig> > , erişim tarihi: 26.02.2021
- [34] **Url-8** < <https://www.kistler.com/?type=669&fid=108744&model=document> > , erişim tarihi: 26.02.2021
- [35] **Url-9** < https://www.avl.com/html/static/ITS_ONLINE/PDFs/E/10_TESTING_EQUIPMENT_8_E.pdf > , erişim tarihi: 26.02.2021
- [36] **Url-10** < <https://www.avl.com/-/mssplus-avl-micro-soot-sensor> > , erişim tarihi: 26.02.2021
- [37] **Url-11** < https://www.micro-epsilon.com/press/publication/pub-en--2014_01_Speed_measurement.pdf > , erişim tarihi: 27.02.2021



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : OĞUZ ŞAFAK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi , Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Otomotiv Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021-... TOGG, Powertrain Sistem Mühendisi
- 2017-2021 yılları arasında Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.'de Motor Kontrol ve Kalibrasyon Mühendisi olarak çalıştı.
 - Dizel Motorun Kısmi ve Tam Yükler İçin Hava & Yakıt Yolu Kontrol ve Kalibrasyonu, Performans ve Emisyon Hedeflerinin Sağlanması, Buna Yönelik Testlerin Koşulması ve Validasyonun Sağlanması
- Kazanılan Ödüller;
 - Ecotorq H625 F-MAX Recognition Award 2019
 - Ecotorq Heavy-Duty Engines Eu6 Emission Recognition Award 2020