

**YOLCU UÇAĞI MOTORLARI İÇİN EMİSYON İNDİSİ
GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEK UÇUŞ
KOŞULLARINDA EMİSYONLARIN BELİRLENMESİ**

Elif YILMAZ
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı
Ocak – 2016

Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı (Proje No: 1209F148) ve TÜBİTAK Bilimsel Araştırma Projeleri
(Proje No: 111Y048) tarafından desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Elif YILMAZ' ın “Yolcu Uçağı Motorları için Emisyon İndisi Geliştirilmesi ve Gerçek Uçuş Koşullarında Emisyonların Belirlenmesi” başlıklı Çevre Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 12.01.2016 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı- Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Yard. Doç. Dr. Ozan Devrim YAY
Üye :	Prof. Dr. Tuncay DÖGEROĞLU
Üye :	Prof. Dr. Abdurrahman BAYRAM
Üye :	Doç. Dr. Enis Turhan TURGUT
Üye :	Doç. Dr. Eftade E. GAGA

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YOLCU UÇAĞI MOTORLARI İÇİN EMİSYON İNDİSİ GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEK UÇUŞ KOŞULLARINDA EMİSYONLARIN BELİRLENMESİ

Elif YILMAZ

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Ozan Devrim YAY
2016, 133 sayfa

Bu çalışma kapsamında, Mayıs 2013 ile Mayıs 2014 tarihleri arasında, yolcu uçaklarının CFM56-7B ve CFM56-3B serisi dört motor tipi ve 14 farklı turbofan motorunda 25 tam test-cell emisyon testi gerçekleştirilmiştir. İstanbul Atatürk Havalimanı Test-cell (bremze) biriminde yeni bakımdan çıkmış turbofan motorlarında rutin olarak yapılan motor testleri sırasında test-cell emisyon ölçümleri yapılmıştır. Motor emisyonlarından CO₂, CO, NO_x (NO₂, NO) ve THC ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda motorların belirli tanımlı çalışma fazlarından CO, NO_x ve THC için ICAO'nun "ANNEX 16 Vol II, Aircraft Engine Emissions" belgesinde yer alan yöntem ile emisyon indisleri belirlenmiş, aynı zamanda motorun çeşitli parametreleri ile emisyon üretimi arasında ilişkiler incelenmiştir.

Hesaplanan emisyon indisleri deniz seviyesi referans koşullarına düzeltilerek, ICAO veri tabanındaki emisyon indisleri ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda gerçek uçuş koşullarında emisyonların hesaplanması ile ilgili çalışma yapılmış, çalışma için CFM56-7B24 ve CFM56-7B26 motoru kullanan Boeing737 ve738 yolcu uçağının dört iç hat uçuşu FDR kayıtlarından yararlanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Turbofan Motoru, Uçak Motor Emisyonları, Emisyon İndisleri, Kemilüminesans, FDR

ABSTRACT

Master of Science Thesis

EMISSION INDEX DEVELOPMENT FOR PASSENGER AIRCRAFT ENGINES AND DETERMINATION OF EMISSIONS AT REAL FLIGHT CONDITIONS

Elif YILMAZ

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Environmental Engineering Program**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ozan Devrim YAY
2016, 133 pages**

In this study, 25 full test-cell emission tests for 14 different turbofan engines from CFM56-7B and CFM56-3B series were performed between May 2013 and May 2014. Emission tests were realized during routine tests made on newly overhauled turbofan engines at Istanbul Ataturk Airport test-cell unit. CO₂, CO, NO_x (NO₂, NO) and THC emissions from the engines were measured. As a result of these measurements, emission indices for CO, NO_x and THC were determined for specific operating phases according to the methods explained in the “ANNEX 16 Vol II, Aircraft Engine Emissions”. The relationship between various engine parameters and emissions were also analyzed.

Calculated emissions indices were corrected for reference sea level conditions, and they were compared with the ICAO database indices. Emissions were also calculated for real flight conditions by making use of the FDR records of four flights made by Boeing 737 and 738 passenger aircraft using CFM56-7B24 and CFM56-7B26 engines

Keywords: Turbofan Engines, Aircraft Engine Emissions, Emission Indices, Chemiluminescence, FDR

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başından sonuna dek görüş ve önerileriyle beni yönlendiren, yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ozan Devrim YAY'a ve projede yer almamı sağlayarak, çalışmanın gerçekleşmesinde büyük katkısı olan, bilgi ve deneyimi ile yol gösteren hocam Doç. Dr. Enis Turhan TURGUT'a;

Bilimsel olarak yorumlarıyla çalışmamın çeşitli dönemlerinde katkıda bulunan hocalarım Prof. Dr. Tuncay DÖĞEROĞLU ve Doç. Dr. Öznur USANMAZ'a; THY Teknik A.Ş. Test-cell'de ölçümler sırasında yardımcı olan Dr. Kadir ARMUTLU ve Araş. Gör. Ali Ozan CANARSLANLAR'a; bilgi ve görüşlerini esirgemeyen, deneyimleri ile manevi katkıda bulunan hocam Doç. Dr. Eftade GAGA'ya; çalışmamın farklı dönemlerinde görüş ve bilgilerine başvurduğum hocalarım Yrd. Doç. Dr. Hicran ALTUĞ'a, Yrd. Doç. Dr. Özlem ÖZDEN ÜZMEZ'e ve Araş. Gör. Akif ARI'ya;

Emisyon ölçümleri sırasındaki yardımları ile emisyon ölçümlerinin verimli bir biçimde yapılmasını sağlayan ve ölçümler ile ilgili her türlü teknik soruna çözüm geliştiren THY Teknik A.Ş. Test-cell personeline, başta test-cell şefi Mehmet UÇARSU'ya, Çetin NOGAN, Ersin GÖKDEMİR, Volkan KADIOĞLU ve Sevdar ÖZKAN'a,

Manevi desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen, eleştirileriyle yorumda bulunan arkadaşlarım Narin POLAT ve Aylin KARAKAŞ'a,

Bugüne kadar aldığım her kararda bana güvenen, eğitim aşamamın her döneminde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen sevgili ailem ve ablam Dilek AYNUR'a

sonsuz ve en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak çalışmaya finansal destek sağlayan; TÜBİTAK'a ve Anadolu Üniversitesi Proje Birimi çalışanlarına teşekkür ederim.

Saygılarımla,

Elif YILMAZ

Ocak- 2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ ve AMAÇ	1
2. TURBOFAN UÇAK MOTORLARI ve EMİSYONLARI	3
2.1. Turbofan Uçak Motorları	3
2.1.1. Hava girişi bölümü (Air inlet).....	5
2.1.2. Fan.....	5
2.1.3. Turbofan motor kompresörü	6
2.1.4. Difüzör	6
2.1.5. Turbofan motorun yanma odası bölümü.....	6
2.1.6. Yanma odası prosesleri	7
2.1.7. Türbin kısmı.....	12
2.1.8. Turbofan motorun egzoz kısmı	13
2.2. LTO Döngüsü ve ICAO Emisyon Standartlarının Tarihsel Gelişimi	13
2.3. Uçak Motoru Emisyonları.....	16
2.4. Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonların Atmosfer ve Sağlık Etkileri	19

2.4.1. Azot oksitler (NO _x)	20
2.4.2. Karbon dioksit (CO ₂)	22
2.4.3. Karbon monoksit (CO)	23
2.4.4. Hidrokarbonlar (HC).....	24
3. KONU ile İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	26
3.1. Küresel/ Bölgesel Emisyon Envanteri ile İlgili Çalışmalar	27
3.2. Havaalanı Yakın Çevresi ile İlgili Etki Değerlendirme Çalışmaları.....	29
3.3. Model Bazlı Envanter Çalışmaları.....	31
3.4. Diğer Deneysel Çalışmalar	32
3.5. Kemilüminesans Analizöründe Girişim Etkisi	41
4. MATERYAL ve YÖNTEM	47
4.1. Emisyon Ölçüm Sistemi	51
4.2. Gaz Analizörleri.....	61
4.3. Testin Yapılışı.....	65
4.4. Yakıt Analizleri.....	67
4.5. Emisyon İndisi Hesaplamaları	68
4.6. Kemilüminesans Ölçümüne Dayalı NO _x Analizöründe Su Girişiminin NO _x (NO-NO ₂) Ölçümlerine Etkisinin İncelenmesi.....	72

5. BULGULAR ve TARTIŞMA	77
5.1. Emisyon Ölçüm Sonuçları	77
5.1.1. CO ₂ emisyonu ve motor parametreleriyle ilişkilendirilmesi	79
5.1.2. CO emisyonları ve motor parametreleriyle ilişkilendirilmesi	82
5.1.3. THC emisyonları.....	87
5.1.4. NO _x emisyonları ve motor parametreleriyle ilişkilendirilmesi.....	90
5.2. Emisyon İndisleri	92
5.3. Gerçek Uçuş Koşullarında Hesaplanan Emisyonlar	102
6. SONUÇLAR	109
KAYNAKLAR	112
EKLER.....	120
Ek-1 Motor parametreleri ve CO ₂ konsantrasyonu	120
Ek-2 Motor parametreleri ve CO konsantrasyonu	124
Ek-3 NO _x konsantrasyonu ve motor parametreleri	128
Ek-4 CO ₂ , CO ve NO _x 'un N1 ile değişimi (Test17)	132
Ek-5 Motorda soğuk ve sıcak çalıştırma CO ve HC konsantrasyonları.....	133

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Yüksek bypasslı turbofan motorunun yapısı.....	4
2.2. Yanma odası bölgelerinde yakıt-hava karışımının kalma süresi ve emisyonlar	8
2.3. Yanma odası hava fazlalık katsayısının (Φ) NO_x ve CO konsantrasyonuna etkisi.....	11
2.4. ICAO tarafından tanımlanan LTO döngüsü (ICAO, 2015)	14
2.5. Motorda yanma tepkimeleri	16
2.6. Motorda yanma ünitesi ürünleri	17
3.1. Kimyasal ışıma yöntemi.....	42
4.1. Tez süresince gerçekleştirilen çalışmaların şematik gösterimi	47
4.2. Emisyon ölçüm sistemi	52
4.3. Uçak motoru emisyon örneklem sistemi akış şeması	52
4.4. Test-cell (bremze) de turbofan motoru	55
4.5. Örneklem hattı: uçak motorundan ısıtılmalı hat bağlantısına kadar (a) yalıtım malzemesi kaplı, ısıtılmalı hata bağlanan hat (b) probdan 2 m lik hat ile örneklem hattına bağlanan hat	56
4.6. Pompalar ve bağlantı kabloları (a) Isıtılmalı pompa (Heated pump) (b) Boşaltma pompası (Dump pump)	57
4.7. (a) Örneklem probu (b) probun motordaki konumu	58
4.8. (a) Dağıtım kutusu ve kalibrasyon tüpleri bağlantı girişleri (b) Dağıtım kutusu içi ve akış vanaları	58
4.9. Gaz şartlandırma ünitesi.....	59
4.10. Sıcaklık kontrol ünitesi	60
4.11. Teledyne 9110TH $\text{NO}/\text{NO}_2/\text{NO}_x$ analizörü	62
4.12. Teledyne 4030 THC analizörü.....	63
4.13. Teledyne 7500 NDIR CO/CO_2 analizörü.....	64
4.14. NO_x analizörü girişim etkisi test düzeneği.....	74
4.15. Perma pure kurutucu ve çalışma prensibi	74
5.1. CFM56-7B26 motoru CO_2 'nin N1 ile değişimi.....	80
5.2. CFM56-3B1 motoru CO_2 'nin N1 ile değişimi	80

5.3. CO ₂ -EGT değişimi (CFM56-7B24 motoru)	81
5.4. CO ₂ -yakıt akışı değişimi (CFM56-7B26 motoru)	81
5.5. CO ₂ konsantrasyonunun yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi (Test17)	82
5.6. CFM56-7B24 motoru CO ile N1 değişimi	83
5.7. Sıcak ve soğuk rölanti CO konsantrasyonu	84
5.8. Test17- Motor devri (N1) ile CO konsantrasyonu ve EGT değişimi.....	85
5.9. Test17- Motor devri (N1) ile CO konsantrasyonu ve yakıt akışı değişimi ...	86
5.10. CO konsantrasyonunun yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi (Test17)	86
5.11. Sıcak ve soğuk rölanti HC konsantrasyonları	88
5.12. Ortalama HC konsantrasyonunun ortalama yakıt akışına ve EGT'ye göre değişimi.....	89
5.13. Ortalama THC konsantrasyonunun yanma odası ortalama giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi (Test17)	89
5.14. NO _x konsantrasyonu N1 ile değişimi	90
5.15. EGT'ye bağlı NO _x değişimi	91
5.16. Yakıt akışına bağlı NO _x konsantrasyonu değişimi.....	91
5.17. NO _x konsantrasyonunun yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi (Test17)	92
5.18. Boeing737 (CFM56-7B24 motorlu) uğağı İstanbul-Van uğuşu toplam emisyonlar.....	105
5.19. Boeing737 (CFM56-7B24 motorlu) uğağı İstanbul-Ankara uğuşu toplam emisyonlar.....	106
5.20. Boeing738 (CFM56-7B26 motorlu) uğağı İstanbul-Van uğuşu toplam emisyonlar.....	107
5.21. Boeing738 (CFM56-7B26 motorlu) uğağı İstanbul-Ankara uğuşu toplam emisyonlar.....	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. ICAO ölçüm standartları	15
3.1. Literatür özeti	36
4.1. Ölçüm yapılan CFM56 tipi motorlar ve ölçüm esnasındaki atmosfer koşulları.....	50
4.2. Emisyon ölçüm analizörlerinin teknik özellikleri	65
4.3. H ₂ O girişim etkisinin NO konsantrasyonuna etkisi	75
4.4. H ₂ O girişim etkisinin NO ₂ konsantrasyonuna etkisi	76
5.1. Tüm testlere ait emisyon ölçüm sonuçları ve indisleri.....	93
5.2. CFM56-3B2 motorunun ortalama emisyon faktörleri ile ICAO değerleri	99
5.3. CFM56-3B1 motorunun ortalama emisyon faktörleri ile ICAO değerleri ..	100
5.4. CFM56-7B24 motorunun ortalama emisyon faktörleri ile ICAO değerleri	101
5.5. Çalışmada kullanılan FDR parametre listesi.....	103
5.6. Taksi süresinin standartlaştırılması durumunda uçuş fazları emisyonlarının toplam emisyona oranlarının değişimi	109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler:

CH ₄	: Metan
C _m H _n	: Hidrokarbonlar
CO	: Karbon monoksit
HC	: Hidrokarbon
kons.	: Konsantrasyon
N1	: Motor fan şaftı hızı (rpm)
N2	: Yüksek basınç kompresör hızı
NO	: Azot monoksit
NO ₂	: Azot dioksit
NO _x	: Azot oksitler (NO + NO ₂)
O ₃	: Ozon
P3	: Yanma odası giriş basıncı (kPa)
PM _{2,5}	: Aerodinamik çapı ≤ 2,5 µm olan partiküler maddeler
SO ₂	: Kükürt dioksit
T3	: Yanma odası giriş sıcaklığı (°C)
φ	: Hava fazlalık katsayısı (equivalence ratio)

Kısaltmalar:

AFR	: Hava-yakıt oranı (Air Fuel Ratio)
APEX	: Aircraft particle emissions experiment
AppC	: Approach soğuk rölanti
AppH	: Approach sıcak rölanti
APU	: Yardımcı güç ünitesi (Auxiliary Power Unit)
BFF2	: Boeing yakıt akış yöntemi-2 (Boeing Fuel Flow Method 2)
BPR	: Bypass oranı (Bypass Ratio)
EASA	: Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (European Aviation Safety Agency)
EGT	: Egzoz gaz sıcaklığı (Exhaust gas temperature, °C)

EI	: Emisyon indisi (g/kg yakıt)
EPA	: Amerikan Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency)
ft	: feet
FF	: Yakıt akışı (Fuel flow, kg/sn)
FAR	: Yakıt-hava oranı (Fuel- air ratio)
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (International Civil Aviation Organization)
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LTO	: İniş-Kalkış Döngüsü (Landing and Take off cycle)
MinC	: Minimum soğuk rölanti
MinH	: Minimum sıcak rölanti
nm	: nanometre
ppm	: Milyonda bir parça (Parts Per Million)
rpm	: Devir (revolution per minute)
THC	: Toplam hidrokarbonlar (Total hydrocarbons)
UFP	: Ultra ince partiküller (ultra fine partiküles, çapı< 100 nm olan partikül maddeler)
UOB	: Uçucu Organik Bileşikler (VOC: Volatile Organic Compounds)
UV	: Ultraviyole

1. GİRİŞ ve AMAC

Hava taşımacılığının küresel ekonomiye sağladığı sosyal ve ekonomik getirilerin yanında, havacılık sektöründen kaynaklanan kirletici emisyonların yerel hava kalitesi ve küresel ölçekte atmosfere etkilerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Havacılık sektöründen kaynaklanan emisyonlar havayolu ulaşımı kullanımının yaygınlaşması ile gelecekte de artarak devam edecektir. Uçak motorlarında yüksek enerji gereksinimi ve yakıt tüketiminin fazla olması nedeni ile atmosfere, sera gazları olan CO₂ ve NO_x gazları emisyonu olmaktadır. Bu gazlarla birlikte diğer önemli kirleticiler olarak CO ve HC gazları atmosfere salınmaktadır. Uçak motorlarından kaynaklanan emisyonların yaklaşık %70 ini CO₂, %30'una yakın kısmını H₂O, geri kalan %1'lik kısmını ise NO_x, CO, SO_x, PM (partikül maddeler), NMVOCs (metan olmayan uçucu organik karbonlar), tehlikeli hava kirleticileri oluşturmaktadır. Metan (CH₄) daha çok hava alanında uçağın rölantide çalıştığı durumda salınmaktadır. Uçak motorlarında kullanılan jet yakıtının yakılması sonucu egzoz emisyonları oluşmaktadır.

Egzoz emisyonları uçak operasyonlarının sayısına ve çeşidine, uçak motorlarının verimine ve türüne, yüksek yakıt tüketimine, uçuş mesafesine, motorun harcadığı güce, her bir uçuş fazında geçen süreye ve uçuş yüksekliğine bağlıdır. Uçakların motor tiplerine, sayılarına, kullandıkları yakıtta, büyüklüklerine ve yük durumlarına göre farklı emisyonları vardır. Uçakların yer seviyesi hava kalitesine etkilerini yerden yüksekte kararlı halde uçuş sırasındaki emisyonlarından daha çok, bu performansın bozulduğu tırmanma ve yaklaşma evrelerindeki emisyonlar belirler (Kesgin, 2006). Bu nedenle ardışık olarak taksi, kalkış, tırmanma, yaklaşma, ve taksi aşamalarından (LTO: Landing and takeoff cycle) oluşan bir uçuş fazı tanımlanmaktadır (ICAO, 2008). Burada en önemli olan evreler taksi ve iniş-kalkış olup, bunların süresinin en azda tutulması uçakların kirleticiliğini azaltıcı bir unsurdur (Kesgin, 2006).

ICAO (International Civil Aviation Organization – Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü) dünyada bütün havacılık faaliyetleri için uçakların LTO ve yüksekte irtifası sırasında temel alınacak standartlar (esaslar) belirlemiştir. Bu standartlar uçağın LTO döngüsü hareketleri için hava alanı çevre hava kalitesine etkisi, yüksekte irtifa sırasında üst atmosferde ozonun azalması ve ozon

tabakasının incelenmesi etkisini göstermek için ve sera gazları olarak bilinen H₂O, CO, CH₄ ve CO₂ gazları emisyonlarının belirlenmesi açısından geliştirilmiştir. Uçaklardan kaynaklanan emisyonların türünün ve miktarının bilinmesi sadece çevresel açıdan değil sağlık açısından da önemli olmaya başlamıştır. Bu bağlamda, NO₂, THC ve CO gaz emisyonları insan sağlığı ve hava kalitesi açısından önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye’de faaliyet gösteren havayolu şirketine ait yolcu uçakları turbofan motorlarının emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 2013 Mayıs- 2014 Mayıs döneminde, yeni bakımdan çıkmış dört farklı motor tipi ve 14 farklı motor için toplam 25 emisyon ölçümü gerçekleştirilmiştir. Söz konusu emisyon ölçümleri İstanbul Atatürk Havaalanında bulunan Türk Hava Yolları Teknik A.Ş’ye (THY Teknik) ait Test-cell (Bremze) biriminde gerçekleştirilmiştir. Bu birimde, iç hat uçuşlarında kullanılan CFM56-7B ve CFM56-3B serisi turbofan uçak motorları teknik bakımdan sonra performans ve fonksiyonel testlerine tabi tutulmaktadır. Bu testler sırasında CO, CO₂, NO_x, NO, NO₂ emisyonları anlık olarak ölçülmüştür. HC emisyonu ise analizörün cevap süresinin üç dakika olması nedeni ile anlık olarak ölçülmeyip, üçer dakikalık aralıklarla veri alınabilmektedir. Test-cell fonksiyon testi sırasında uçağın normal uçuş fazları olan; minimum rölanti (idle), yaklaşma rölanti (idle), maksimum sürekli (max. continuous), kalkış (take off) fazlarında ve farklı motor devirlerindeki emisyonlar ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda motorların belirli tanımlı çalışma fazları için emisyon indisleri (havacılık sektöründe “emisyon faktörü” yerine “emisyon indisi” ifadesi daha sık kullanılmaktadır) belirlenmiş aynı zamanda motorun çeşitli parametreleri ile emisyon üretimi arasında ilişkiler incelenmiştir.

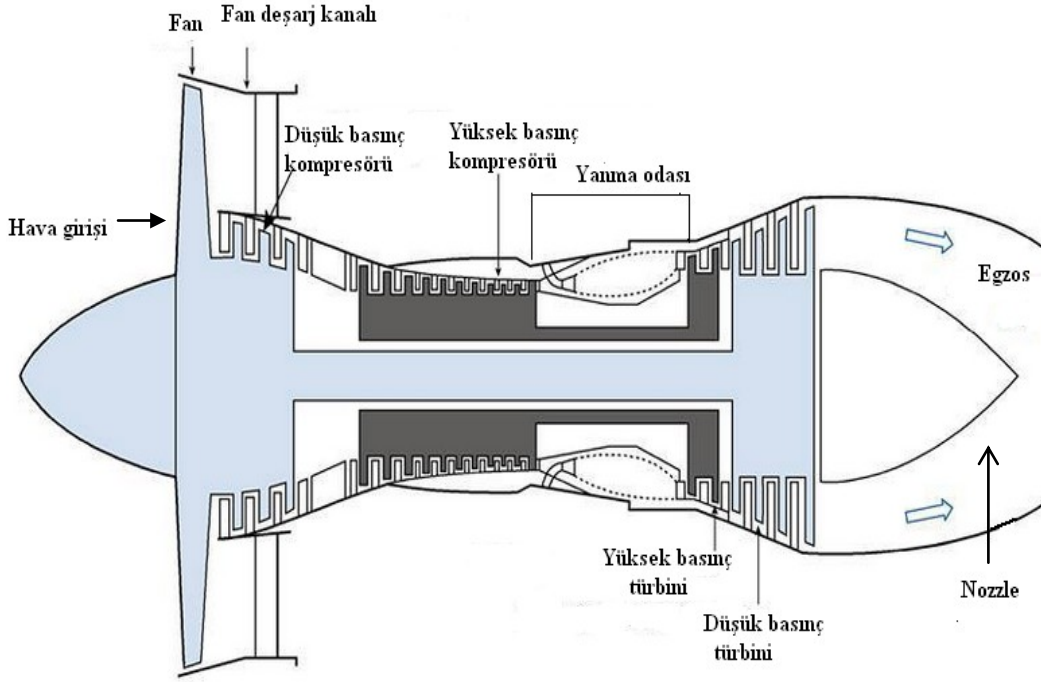
Bu çalışmanın amacı, yeni bakımdan çıkmış uçak motorlarının emisyonlarını her faz için belirlemek ve emisyon ölçümlerinden CFM56-7B ve -3B motorları için güncel emisyon indisleri geliştirmek ve ICAO veri tabanı (EASA,2015) ile karşılaştırmaktır. Çalışmada, gerçek uçuş koşullarında emisyon ölçümü yapılan bazı motor tiplerinin kullanıldığı turbofan yolcu uçaklarının iç hat uzun ve kısa mesafeli uçuşları için toplam emisyonlarının bulunması da amaçlanmıştır.

2. TURBOFAN UÇAK MOTORLARI VE EMİSYONLARI

2.1. Turbofan Uçak Motorları

Günümüzde hem sivil hem de askeri uçaklarda kullanılan turbofan motorları turbojet motorunun ön kısmına daha büyük çapta bir fan yerleştirilerek dönen parçalarının bulunduğu kısmın ayrıca dışından bypass denilen, yanmaya uğramayan, motor gücünü, yakıt verimini arttıran ve gürültüyü azaltan, hava akışı geçen bir motor teknolojisi geliştirilmiştir (Sayed, 2008). Bu motorlar, uzun mesafeli, ses hızının altında (subsonic) uçuşlar için birçok hava yolu tarafından ticari uçaklarda kullanılır.

Turbofan motorlar; fan, kompresör, yanma odası, türbin, egzoz kısımlarından oluşmaktadır. Fan ve kompresör tarafından çekilen havanın çoğu motorun “engine core” denilen iç kısmına yönlendirilir. Önce alçak basınç sonra da yüksek basınç kompresöründe sıkıştırılarak basınç dolayısı ile enerjisi arttırılan, böylece yanma odasına gelen hava, yakıt ile karıştırılarak yüksek sıcaklıkta yanmaya uğrayıp genişler ve büyük bir sıcaklık ve enerji ile önce yüksek basınç daha sonra da düşük basınç türbinine gelir. Bu şekilde yüksek enerji içeren yanma ürünleri türbin pallerine çarparak türbini döndürürler. Türbinde gaz enerjisi kompresörü, fanı ve motora ait bazı aksesuarları döndürmek için kinetik enerjiye çevrilir. Motor içiçe geçmiş genelde çift şaftlı olup şaftın birine (N1) alçak basınç kompresörü ve türbini, diğerine de (N2; yüksek basınç kompresör şaftı hızı) yüksek basınç türbini ve kompresörü bağlıdır. Motor merkezine girmeyen ve bypass diye adlandırılan havanın bir kısmı (ikincil hava) motorun dönen parçalarının bulunduğu gövdenin dışından geçerek yanmaya uğramaz ve nozzle denilen egzoz çıkış yerinde *mixer* vasıtası ile sıcak ve soğuk hava birbiri ile karıştırılarak büyük bir tepki kuvveti oluşur. Böylece uçak büyük bir ivme dolayısı ile hız kazanmış olarak ileriye doğru hareket eder (Flack, 2005).



Şekil 2.1. Yüksek bypasslı turbofan motorunun yapısı (Crane,2002)

Fandan geçen ve yanmaya uğramayan ikincil hava akışının, motor içinden kompresör, yanma odası boyunca geçen birincil hava akışına oranına bypass oranı (α) denir (Kerrebrock, 1992). Modern uçaklar için tipik bypass oranı 0.5 ile 9 arasındadır (Flack, 2005). Büyük ticari hava yolları CFM56, PW400 ve CF6 gibi yüksek bypass oranlı uçak motorlarını bünyesinde bulundurur (Sayed, 2008). Turbofan motorlarda tepkinin %70-75'i ikincil hava akışından, geri kalan %20-25'lik kısım birincil hava akışından sağlanır. İkincil hava akışı motor üzerinde belli bölgelerin soğutulması için de kullanılır. Tepkinin büyük kısmı fandan sağlandığı için turbofan motorların yakıt verimi yüksektir (Karakoç ve Turgut, 2008).

Tipik turbofan motorlarda genellikle birbiri içerisinde dönen iki şaft sistemi bulunur (bazı motorlarda bu sayı üç de olabilmektedir). Bu şaft sistemlerinden N1 ismi ile tanımlananı, bir ucunda fan ünitesi ile alçak basınç kompresörü, diğer ucunda alçak basınç türbini şeklindedir. N2 ile tanımlananı ise ön ucunda yüksek basınç kompresörü, arka ucunda ise yüksek basınç türbini olacak şekildedir. Şaftlar birbirinden farklı hızlarda dönerler. Bu şaft sistemlerinden N2'den daha çok motorun sistemleri ile ilgili konularda bahsedilir. Bunun nedeni, motordaki pompa ve jeneratör gibi tüm aksesuarların mekanik

enerjilerini bu şafttan alıyor olmalarıdır. N1 ise motorun performansı ile ilgilidir. Turbofan motorlarda itkinin büyük bir kısmı fan adı verilen üniteden karşılıyor olması ve fanın da N1 şaftına bağlı olması bu ilginin en önemli nedenidir. Dolayısıyla motor performansı N1 ile ilişkilendirilmektedir (bazı motor üreticileri bu ilişki için motor basınç oranı gibi başka parametreler de kullanabilmektedir) (Flack, 2005).

2.1.1. Hava girişi bölümü (Air inlet)

Motorun en önde bulunan parçası olan hava alığı kompresöre uygun şartlarda hava akışı sağlar. Akışın momentumunun düşürüldüğü, basıncının arttırıldığı ve içinde herhangi bir işin yapılmadığı bir tür difüzör görevi yapar (Karakoç ve Turgut, 2008).

Motordaki bu ünite için ‘inlet duct, inlet cowl, intake nose veya nose cowl’ isimlerinden birisi kullanılmaktadır. Inlet duct’un çapı arkaya doğru gidildikçe genişleyen bir yapıdadır. Bu tasarım, giren havanın dinamik basıncının statik basınca dönüşmesine yardım eder. Düzgün bir akış sağlar. Böylece motorun verimini azaltacak olan hava akışındaki bozulmaları önler (Sayed, 2008).

2.1.2. Fan

Fan pervanede olduğu gibi üzerinden geçen havayı ivmelendirir. İvmelenen hava kütlesi ters yönde bir tepki oluşturur. Fan nedeniyle ortaya çıkan bu tepki BPR’ye (bypass oranı) bağlı olarak toplam tepkinin büyük bir bölümünü oluşturur. Fandan geçen bu hava, fanı terk ettikten sonra yanmaya gönderilmez. Fanın ucundaki bir *nozzle* veya *fan duct*’tan motor boyunca uzatılarak bu hava ana motor egzoz kanalı çevresinden atmosfere gönderilir. Bu tiplere ilave olarak bir diğer turbofan türünde ise fandan gelen hava ve ana motorda türbini terk eden egzoz gazları karıştırılır ve tek bir egzoz lülesinde bu karışım çıkartılır (Mattingly ve ark. 2002).

2.1.3. Turbofan motor kompresörü

Kompresör, yanma odasına sürekli hava akışı sağlayan kısımdır. Kompresör hareketini şaft vasıtasıyla türbinden alır ve genellikle türbin şaftına direk bağlıdır (Mattingly ve ark. 2002).

Kompresör içinde havanın basıncı arttıkça yoğunluğu da artar. Sonuçta, havanın gereksinimi olan hacim azalır. Bu durumda akış hızının sabit kalmasını sağlamak için kompresör içindeki hava akış aralığı önden arkaya doğru daralan bir kesitte tasarlanmıştır. (Wild ve Sterkenburg, 2008).

2.1.4. Difüzör

Motorda kompresör ile yanma odası arasındaki bölümdür. Difüzörün görevi kompresörden çıkan havanın hızını düşürerek yanma için uygun hıza hazırlamaktır. Hız düşerken statik basınç artar. Difüzör, motorda en yüksek basıncın olduğu bölümdür (Karakoç ve Turgut, 2008).

2.1.5. Turbofan motorun yanma odası bölümü

Yanma odası, türbin ve jet nozzle için sıcak gaz akımı üretir ve yakıt-hava karışımının sürekli yanmasını sağlar. Burada amaç, büyük miktardaki yakıtın tutuşturulması, yakılması, türbinin her çalışma koşulunda ihtiyacı olan kompresör tarafından gönderilen havanın genleştirilmesi, hız kazandırılması ve bu havanın düzgün bir akımla burayı terk edip türbine gitmesidir. Belirlenen limitler içinde minimum basınç kaybı ve maksimum güvenli sıcaklık elde edilir. Hava içine karıştırılacak olan yakıt miktarı yanma odası, türbin kısımlarının yapıldığı metallerin dayanabileceği limitlere uygun olmalıdır. Yanma odasının çalışabilmesi için 500-600 °C yanma odası giriş sıcaklığına ihtiyacı vardır (Flack, 2005; Farokhi, 2009).

Ticari hava taşımacılığı arttıkça yanma verimi daha önemli hale gelmiştir çünkü bu artışla birlikte hava kirliliği de artmaya başlamıştır. Güvenli ve verimli çalışma için yanma odasında aranan özellikler; yerde ve uçuşta emniyetli

ateşleme, tüm çalışma koşullarında istikrarlı yanma, tam yanma (yakıtın tamamının yanması), çıkışta eşit sıcaklık dağılımı, minimum basınç kaybı oluşturacak şekilde yanma, küçük ve hafif olması, yeterli soğutma sistemine sahip olması, yüksek çalışma ömrüdür.

Motorlarda birkaç tip yanma odası kullanılır, hepsinde ortak olan iki ana komponent vardır: İç-dış kasa (inner-outer case) ve alev borusu (flame tube). İç-dış kasa yanma odasında, yanma öncesi ve sonrası hava basınç yüklerini karşılar. İç ve dış motor komponentlerini sıcak gazlardan korur. Flame tube (alev borusu) ve diğer komponentleri taşır (yakıt lüleleri ve bujiler). Alev borusu, içinde alevi barındırır ve alevi kontrol ederek yönlendirir (Oates, 1989).

Yanma odası birincil bölgesinde bulunan metaller yüksek gaz sıcaklığına karşı dayanıklı olmalıdır. Bunun için ısıya karşı dayanıklı metaller kullanmak ve 'flame tube'ün iç kısmını soğutup yalıtımak gereklidir. Yanma odası yanmadan dolayı oluşan korozyon, ısı kaybı, titreşimli ve basınçlı yüklere karşı dayanıklı olmalıdır. Nikel bazlı alaşımdan ya da seramik kompozitten yapılır (Flack, 2005).

2.1.6. Yanma odası prosesleri

Motorda yanma, yakıt- hava karışımının, ateşleme sistemi tarafından tutuşturulmasıyla başlar. Yanma işlemi için sıkıştırılmış hava yanma odasına girer. Yakıt lüleleri, yakıtı hava akışının merkezine doğru püskürtür. Yakıt buharlaşarak hava akışına karışır. Bujiler elektrik kıvılcımları oluşturarak ateşleme yapar ve yanmayı başlatır. Bujiler (ateşleyici) 40-50 sn. devrede kalıp sonra devreden çıkar. Yanma odasına sürekli hava ve yakıt belli oranda geldiği sürece yanma işlemi devam eder.

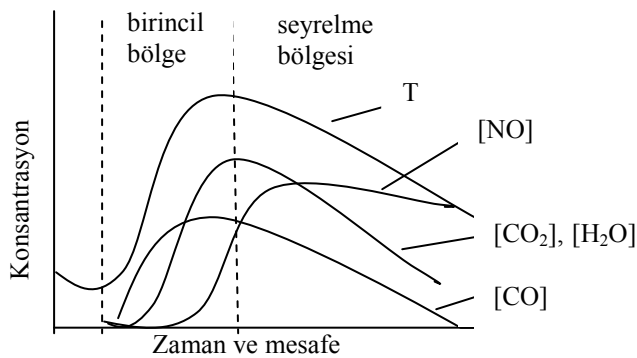
Yanma odası, kompresör çıkış koşullarında havanın yakıtla reaksiyonunun gerçekleştiği bölgedir. Kerosen tipi hidrokarbonlu jet yakıtının hava ile karışımında meydana gelen yanma motor hızında belirleyici rol oynar ve kompresör çıkış havası özellikleri, motor hızının yanısıra yükseklikle sıcaklık ve basınçtaki değişime göre değişir.

Motorda normal koşullar altında, yanma hızı sadece reaksiyon hızıyla değil, yakıt buharı ve hava karışımının yeterli olmadığı bölgenin oluşması ile de

sınırlanır. Yanma odasında birincil bölge ve seyrelme bölgesi oluşur. Yanma odasına yakıt atomize olmuş halde, hava ve sıcak yanma gazlarının karıştığı birincil bölge olan sıcak bölge içine doğru enjekte edilir. Yakıt buharlaşır, buhar hava ile türbülans oluşturarak karışır. Eğer sıcaklık ve basınç reaksiyon bölgesinde yeterince yüksek ise, reaksiyon hızı sınırlanmaz ve yakıt buharı sonunda yeterli oksijenle temas eder ve reaksiyon tam olarak gerçekleşir.

Turbofan motoru yanma odasına giren birincil hava reaksiyon bölgesinde yakıtla karışarak yakıtın yakılmasında kullanılır. Kalan hava ise yanma ürünlerinin türbin nozzle'a girmeden önce seyreltilmesinde kullanılır. Gaz sıcaklığı birinci bölgede oldukça yüksektir (2900-3000°C) ve yanma odasının yapıldığı materyalin tolere edebileceği sıcaklıktan daha fazladır. Bu yüzden etkili bir soğutmaya gerek vardır. Yanma için kullanılmayan havanın %60'ı soğutma ve gazların seyreltilmesi için kullanılır (Sayed, 2008).

Motorda yanma prosesini etkileyen diğer bir faktör de yakıt-hava karışımının yanma odasında kalma süresidir. Kalma süresinin azaltılması yakıtın eksik yanmasına ve dolayısıyla HC ve CO konsantrasyonunun artmasına neden olur. Yanma odası bölgelerinde kalma süresi ve emisyonların durumu Şekil 2.2.'de verilmektedir. Idle (rölanti) koşullarında yanma odasında kalma süresi daha düşükken, yüksek itki koşullarında bu süre daha uzundur. Yakıt lülesi boyunca yakıt akışının düşük olması zayıf atomizasyona neden olur ve yanma verimini azaltır.



Şekil 2.2. Yanma odası bölgelerinde yakıt-hava karışımının kalma süresi ve emisyonlar (Kerrebrock, 1992)

Birinci bölge sıcaklığı, yakıtın yanma hızının çok yüksek olduğundaki sıcaklıktan daha düşüktür. Yakıt yandığında sıcaklık hızlı bir şekilde yükselir ve CO, CO₂ ve H₂O konsantrasyonları kısa bir süre içinde birincil bölgede artar. Eğer

bir miktar O₂ mevcutsa, CO yükseltgenir; CO₂ ve NO oluşumu yüksek sıcaklıkta gerçekleşmeye başlar. En yüksek sıcaklığa ulaşıldığında NO konsantrasyonu dengeye ulaşır. Daha sonra, yanma odası ikincil bölgesinde gazlar kalan fazla havayla karışarak soğur. İkincil bölgede azalan sıcaklıkla NO konsantrasyonu azalır.

NO_x, oksijenin mevcut olduğu yanma odası bölgelerinde 2.1. reaksiyonu neticesinde oluşur. Oksijenin atomlarına ayrılması ve dolayısıyla bu reaksiyonun gerçekleşmesi de sıcaklığa bağlıdır. Birincil bölgedeki sıcaklık ve yakıt-hava karışımı kalma süresi NO oluşumunu kontrol eder. NO oluşum hızı denklem 2.2.'deki gibi açıklanabilir (Oates, 1989):



$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k [N_2][O_2] \quad (2.2)$$

Burada, [] ppm olarak gaz karışımındaki konsantrasyon, k reaksiyon-hızı sabitidir.

NO_x emisyonları yüksek motor güçlerinde en fazladır. NO sadece yanma odası yüksek sıcaklık bölgesi olan birincil bölgede 1800°K ve üstü sıcaklıklarda oluşur. Yanma odası giriş sıcaklığı direk olarak kompresör basınç oranına bağlıdır, yanma odası giriş basıncı arttıkça NO'nun da artması beklenir (Farokhi, 2009). NO'nun NO₂'ye oksidasyonu ekzotermik (ısı veren) bir reaksiyonla gerçekleştiği için düşük sıcaklık bölgelerinde sıcaklığın düşmesi ve türbin kısmına girmeden önce gazın soğuması ile NO₂ oluşum hızı artar (Farokhi,2009; Flagan ve Stern,1988).

Karbon monoksit ve hidrokarbon emisyonları motor güç seviyesine oldukça bağlıdır. Motorda itki arttıkça, yanma sistemi yakıt-hava oranını arttırdığı gibi giriş sıcaklığını ve basıncı yükseltir. Artan yakıt akışı ve yüksek yanma odası giriş sıcaklığı yakıtın atomize olmasını ve buharlaşmasını artırır. Yakıtın fazla, havanın az olduğu düşük motor itkilerinde CO ve HC emisyonları artar. Yanmamış hidrokarbonlar; yakıtın bir kısmının yanmadan kalması, zayıf atomizasyon, buharlaşma ve kalma süresinin kısa olması veya yanma odası içinde soğuma bölgeleri oluşumu nedeni ile artar (Farokhi, 2009).

Birincil hava akışının yaklaşık % 25'i yanmada kullanılır, geriye kalan % 75'lik kısım yanma odası bölümlerinin ve kanallarının soğutulmasında ve gazların

türbin bölgesine geçmeden önce seyreltilmesinde kullanılır. Yanma sıcaklığı ne kadar fazla olursa yanma o kadar verimli olur.

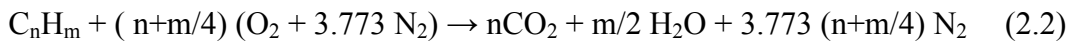
Termodinamik açıdan yanma prosesi açıklanırsa; yanma prosesi sıvı yakıtın spray şeklinde yakıt lülelerinden püskürtülmesi ve buharlaşan yakıtın birincil hava ile karıştırılması neticesinde gerçekleşir. Yanmadan önce yakıtın sıcaklığının artması ve yakıtın buharlaşması için gereken ısı için, sıcak sıkıştırılmış havanın entalpisini kullanır.

Reaksiyon hızı statik basınca “P” ve sıcaklığa “T” bağlıdır. Çoğu durum için reaksiyon hızı Arrhenius eşitliği ile belirlenir (Kerrebrock, 1992).

$$\text{Reaksiyon hızı; } P^n f(T) e^{-E/RT}$$

şeklinde yazılıp, burada “n” molekül sayısına (H/C) bağlı olarak kullanılan bir değerdir. Hidrokarbon yanması için n=2 olarak yazılır. f(T) ise sıcaklıkla ilgili fonksiyon, E aktivasyon enerjisi, R ideal gaz sabitidir.

Düşük basınçta reaksiyon hızı yavaştır ve uçak motoru için yüksek irtifalarda sınırlanabilir. Eğer sıcaklık ve basınç reaksiyon bölgesinde yeterince yüksekse reaksiyon hızlı olacak ve yakıt buharı yeterli oksijenle reaksiyona girecektir. Bu yüzden hızlı ve yeterli bir reaksiyon uygun oksijen varlığı altında gerçekleşmelidir ve bunun için gerekli oksijen oranına stokiyometrik oksijen oranı denir. Bu oranlarda hidrokarbon yakıtı tam olarak yanarak reaksiyon sonucu CO₂ ve H₂O oluşur. Tam yanma olduğu varsayılırsa hidrokarbon yakıtı (C_nH_m) için tam yanma reaksiyonu aşağıdaki şekilde (denklem 2.2.) yazılır (Sayed, 2008).



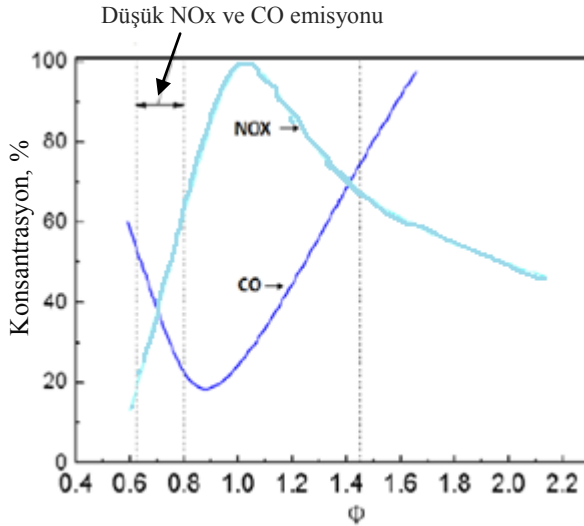
Burada moleküler ağırlıkları sırasıyla oksijen, atmosferik azot, atomik karbon ve hidrojen için sırasıyla 32, 28.16, 12.011 ve 1.008 g/mol dur. Yanma denkleminde hava-yakıt oranının (AFR) stokiyometrik (yakıttaki bütün ürünlerin okside olması için gereken oksijen) oluşu tam yanmayı etkiler. Stokiyometrik AFR yakıt kompozisyonuna bağlıdır. Normal operasyon koşullarında yanma odasının hava- yakıt oranı 45:1 den 130:1 e kadar değişen oranlardadır. Bununla birlikte kerosenin verimli olarak yanma prosesinde bu oran 15:1 kadar olup, hava-yakıt oranı denklemi 2.3.’deki gibidir (Sayed, 2008).

$$\frac{A}{F} = \frac{\left(n + \frac{m}{4}\right) (32 + 3.773 \times 28.16)}{n \times 12.11 + m \times 1.008} \quad (2.3)$$

Yakıt stokiyometrik AFR oranından farklı değerde yanarsa, karışım zayıf ve zengin olarak nitelendirilip; oksijen az yakıt fazla ise zengin karışım, oksijen fazla yakıt az ise zayıf karışım olarak ifade edilebilir. Eğer yanma düşük AFR değerinde gerçekleşirse oksijen azlığı nedeni ile yakıt tam olarak yanmaz, eksik yanma meydana gelir ve yakıt kısmen yanar. Bu durum karbon monoksit ve hidrokarbon oluşumu ile sonuçlanır. Yanma ürünleri yakıtın hava ile karışımının zayıf ya da zengin karışım olmasına göre değişir. Gerçek AFR'nin stokiyometrik (teorik) AFR'ye oranı equivalence ratio- hava fazlalık katsayısı olarak tanımlanır.

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{gerçek}}}{(A/F)_{\text{teorik}}} \quad (2.4)$$

Eğer yanma sırasında çok fazla yakıt, az oksijen (hava) var ise $\Phi < 1$; $\Phi = 1$ ise stokiyometrik ve yakıt az, hava fazla ise $\Phi > 1$ dir. Yanma odasında hava fazlalık katsayısına bağlı olarak NOx ve CO konsantrasyonundaki değişim Şekil 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.3. Yanma odası hava fazlalık katsayısının (Φ) NOx ve CO konsantrasyonuna etkisi (Renyu ve Man, 2011)

Yanma odasında yakıt-hava oranının artmasıyla birlikte CO konsantrasyonu artar, bunun tam tersi NOx konsantrasyonu azalmaya başlar.

2.1.7. Türbin kısmı

Yanma odasında yanan sıcak ve basınçlı gaz, türbine gider. Türbin kademeleri yanmış gazı aynı basınçla egzoz borusuna aktarmaktadır. Motorda en sıcak kısım türbin girişidir. Bu yüksek sıcaklık değerinin tepki üzerinde doğrudan etkisi bulunur. Türbinden elde edilen enerjinin yaklaşık dörtte üçü bir şaftla bağlı bulunduğu kompresörü döndürmek için kullanılır. Yanma odasından gelen yüksek sıcaklıktaki gazı düşük bir basınç ve sıcaklığa genişleterek yakıttan elde edilen kimyasal enerjinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi sağlanmış olur. Gazların türbine geliş sıcaklıkları 850-1700°C arasında olmaktadır (Karakoç ve Turgut, 2008). Türbin sıcaklığı yüksek olduğu için türbin diskleri malzemesi olarak nikel alaşımlar kullanılır (Sayed, 2008; Kerrebrock)

Türbin, yanma odasından gelen sıcak gazların enerjisinin önemli bir kısmının kullanılarak, motorda kompresör ve dişli kutusunu (accessory gearbox) tahrik edecek gücün sağlandığı bölümdür (Flack, 2005).

Bir türbin, yanma odası çıkış lüleleri (combustion discharge nozzles), lüle kılavuz kanatçıkları, türbin diski ve türbin pallerinden (türbine blades) oluşur (Mattingly ve ark. 2002).

Yanma işleminden sonra genişleyen gaz, türbinde karşılaşacağı ilk kademe olan hareketsiz lülelerin yakınsak şekillerinden dolayı bu lülelere doğru ivmelenerek hareket eder. Lülelerden geçtikten sonra türbin pallerine çarpan gaz akışının enerjisi paller tarafından alınır ve türbin rotorunun hızlı bir şekilde dönmesi sağlanır. Türbine uygulanan kuvvet ya da dönüş gücü, gaz akışının kütleli debisi ile türbin giriş ve çıkışındaki gazın enerji değişimine bağlıdır (Karakoç ve Turgut, 2008).

2.1.8. Turbofan motorun egzoz kısmı

Gaz türbinli motorlarda egzoz kısmı paslanmaz çelik ve titanyum alaşımlarından yapılmıştır (Sayed, 2008). Uçak motorlarında kullanılan egzoz sisteminin ana görevleri motor tipine bağlı olarak değişiklik gösterir.

Gaz türbinli motorda egzoz sistemi türbin çıkışındaki egzoz gazlarını dışarı atar. Ana işlevi motor tipine bağlıdır. Türbinden gelen sıcak gaz egzoz borusuna girdikten sonra egzoz lülesinden dışarıya çıkar ve bu uçağın ileriye hareket etmesini sağlar. Bu bölümdeki aşırı ısınmayı önlemek amacıyla ön bölümden giren havanın bir bölümü egzoz borusunun dış yüzeyine yönlendirilerek soğutma işlemi gerçekleştirilir. Soğuk ve sıcak gazların karıştırıcı veya ortak egzoz lülesi kullanılarak karıştırılması ile egzoz gazlarının hızı düşürülür. İtke verimi artırılır, bu sayede daha az egzoz gürültüsü oluşur. Ters itki kullanılarak egzoz gazlarının yönünün belirli açılarda sapması sağlanarak ek bir frenleme gücünün oluşmasına imkân verir. Genel olarak egzoz lülesi, yanmış gazların düzgün ve belirli debide ivmelendirilerek dışarı atılması ile jet tepkisi oluşturur ve motorun aerodinamik yapısını tamamlar. Egzoz lülesi yüksek itki verimi elde edilmesi ve egzoz gürültüsünün azaltılmasını sağlar (Wild ve Sterkenburg, 2008).

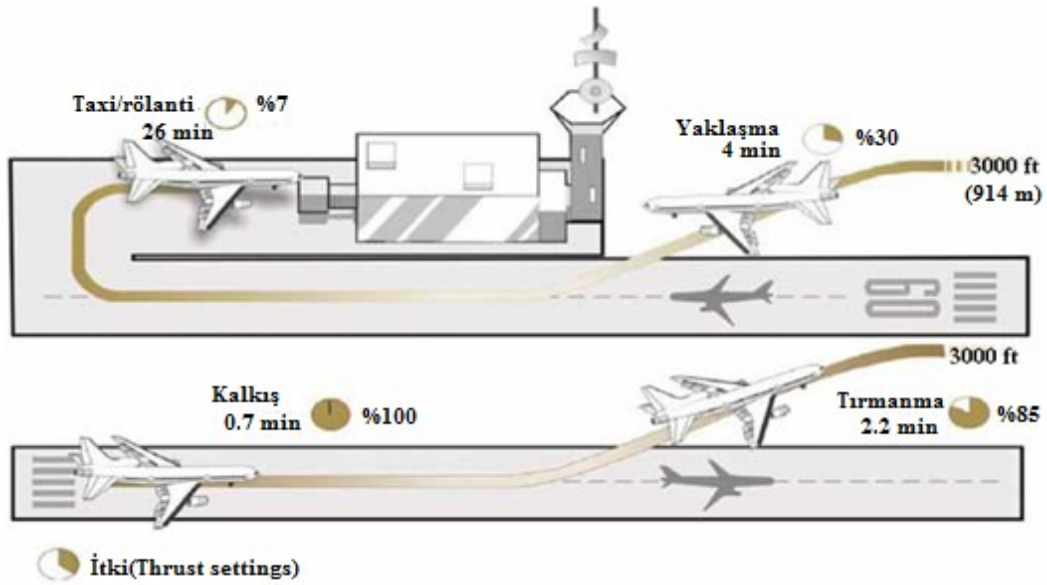
2.2. LTO Döngüsü ve ICAO Emisyon Standartlarının Tarihsel Gelişimi

Amerikan Çevre Koruma Ajansı (USEPA) uçak emisyonlarının etkilerini ortaya koymak açısından 1970'lerden itibaren çalışmalar yürütmektedir ve uçak emisyonları ile ilgili yönetmelik ve sınırlandırmalar getirmiştir. EPA Clean Air Act 1970 yılında uçak tipi ve uçak motorları için emisyon standartları yayınlamış ve bu emisyonların halk sağlığına ve hava kirliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. 1973 Temmuz ayında EPA; CO, HC, NO_x ve duman (Smoke) emisyonları için standartlar yayınlamıştır. Her bir kirletici için izin verilen en yüksek miktarı belirtmiş ve 3000 feet (915 m) altındaki LTO döngüsü için sınır değerler motor itkisi başına yönetmelikte yer almıştır. Bu standart değerler 1 Ocak 1979'dan itibaren uygulanmaya başlanmıştır. Burada CO, UHC ve NO_x emisyon

indisi birimleri g-kirletici/ kg yakıt-saat-itki olarak verilmiştir (Farokhi, 2009). Bu standartlar deniz seviyesi statik koşullarında ölçülen emisyonlardan geliştirilmiştir.

1981 yılında ICAO motor basınç oranına ve motor itkisine bağlı emisyon standartlarını yayınlamış ve geliştirdikleri emisyon indisleri gram kirletici/kg yakıt olarak ifade edilmiştir. Çok sayıda motor türü için en kapsamlı standartları ICAO yayınlamış ve üye ülkelere üretilecek yeni motorlarda bu standartlara uyulması zorunluluğu getirmiştir (EPA,1978).

Hava alanı çevresinde uçaklardan kaynaklanan kirleticileri kontrol etmek için ICAO emisyon ölçüm prosedürleri ve HC, CO ve NO_x için yönetmelik sınır değerleri getirmiştir (ICAO, 2015). Uçak motorunun operasyonel koşullarını karakterize etmek amacıyla yer seviyesinden 3000 feet (914 m) karışma yüksekliğine kadar uçuş döngüsü (LTO döngüsü) tanımlanmaktadır. Uçakların 3000 feet'in altındaki rölanti-kalkış-tırmanma-yaklaşma-rölanti fazlarını kapsayan döngüye LTO döngüsü denilmektedir (ICAO, 2008). ICAO tarafından tanımlanan LTO döngüsü Şekil 2.4.'te verilmektedir.



Şekil 2.4. ICAO tarafından tanımlanan LTO döngüsü (ICAO, 201

ICAO, turbofan, turbojet ve piston motorlarda gerçekleştirilen ölçümler neticesinde bir veri tabanı hazırlamıştır (EASA, 2015). ICAO veri tabanında uçuşun LTO fazlarında tüketilen yakıt miktarına göre emisyon indisleri yayınlanmıştır. Turbofan motorları için 26.7 kN itkiye kadar olan ve deniz seviyesi standart atmosfer koşullarına göre düzenlenmiş emisyon standartları, ölçüm gereklilikleri ve standartlar ICAO sertifikasyon sürecinin bir parçasıdır. ICAO ölçüm standartları, ICAO Annex 16, Volume II, Aircraft Engine Emissions belgesinde yer almaktadır. ICAO'nun test prosedürleri uçuş fazına ve her fazda harcanan zamana göre Çizelge 2.1.'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. ICAO ölçüm standartları

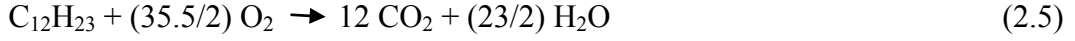
Uçuş Fazı	İtke (%)	Süre (dk)
Takeoff (Kalkış)	100	0.7
Climb (Tırmanma)	85	2.2
Approach (Yaklaşma)	30	4.0
Taksi (Rölanti)	7	26

[EASA \(2015\).](#)

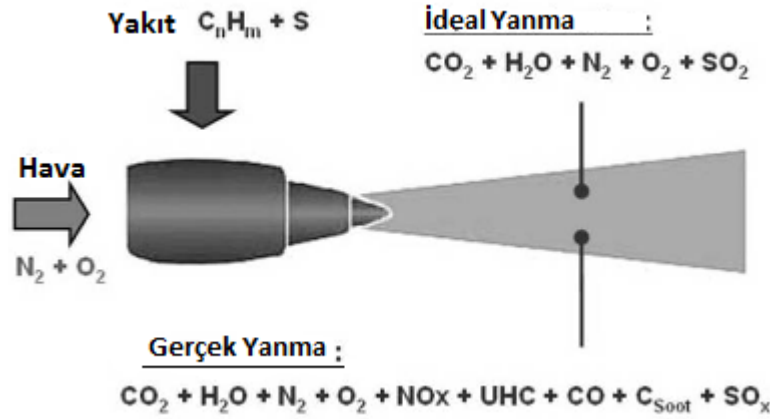
Bunun dışında FAA-Federal Aviation Administration (Federal Havacılık Kurumu) 1980 yılında Federal Aviation Regulations adı altında sivil uçaklar için egzoz emisyon standartları yayınlamıştır.

2.3. Uçak Motoru Emisyonları

Turbofan uçak motorlarında ideal şartlar altında, hidrokarbonlu jet yakıtlarının tam yanmasından reaksiyon 2.5.'e göre CO₂ ve su buharı (H₂O) oluşur (Matthew, 2004).

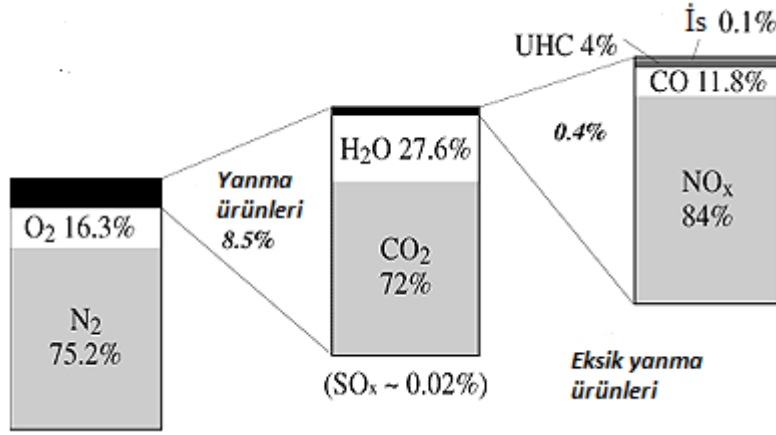


şeklinde bir tam yanma denklemi tanımlanır ve ideal yanma durumunda birincil emisyonlar olarak CO₂ ve H₂O bileşiklerinin oluşması beklenir. Ancak; yakıt-hava oranı, yakıtın safsızlığı, aşırı oksijen (O₂) varlığı ve yanma odası sıcaklığı gibi değişen parametrelere göre gerçek yanma tepkimesi Şekil 2.5'deki gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 2.5. Motorda yanma tepkimeleri (IPCC, 1999)

Gerçek ve ideal yanma tepkimesine göre değişen oranlarda emisyon beklenir. Şekil 2.6'da özetlendiği gibi yanma ürünlerinin %99 kadarını tam yanma ürünleri olan H₂O ve CO₂ oluşturur. Kükürt dioksit (SO₂) emisyonları yakıttaki kükürt içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Uçucu organik bileşikler (VOC) ve hidrokarbonlar, karbon monoksit (CO) ve partikül maddelerin emisyonları ise tam olmayan yanma sonucu gerçekleşmekte ve esas olarak motor itkisinin düşük olduğu rölanti (idle) devirlerinde ortaya çıkmaktadır.



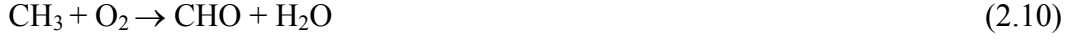
Şekil 2.6. Motorda yanma ünitesi ürünleri (IPCC, 1999)

Yanma odasında CO'nun oluşması ile CO₂'nin oluşması arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır (Oates,1989). CO'nun, CO₂'ye dönüşmesinde OH⁻ iyonu önemli rol oynar. Bu iyon aşağıdaki reaksiyonla oluşur ve OH⁻ iyonu CO ile tekrar reaksiyona girerek CO₂'ye dönüşür.



Yanma işlemlerinde tam yanma olmadığı durumlarda bölgesel eksik yanmalar meydana gelir ve CO oluşumu artar, buna bağlı olarak da CO₂ oluşumu azalır. Yanma odasına gönderilen havanın türbülanslı oluşu yanma kalitesini iyileştirir. Türbülans arttıkça CO miktarı düşmekte ve CO₂ miktarı da yükselmektedir. Sıcaklık ve basınç yükseldikçe, oksidasyon reaksiyonlarına bağlı olarak CO₂ konsantrasyonları artar. Oksijenin parçalanarak CO₂ oluşturmak için CO ile reaksiyona girmesi, yanma odası sıcaklık artışı ile doğru orantılı olarak değişmektedir (Oates,1989). CO, yanma odasında yakıtın yanması sırasında yanmaya katılan hava miktarı ile değişim göstermektedir. Gaz sıcaklığının düşük olması, yanma için yeterli oksijenin bulunmaması ve CO'nun CO₂'ye dönüşüm süresinin kısa olmasından dolayı yanmanın tamamlanmamış olması CO miktarını artırmaktadır. CO'nun oluşumu C ve H ihtiva eden yakıtların oksijenle

oksidasyonundan kaynaklanır. Aşağıdaki reaksiyonlarda görüldüğü gibi çıkan ürünlerin parçalanması ile CO oluşmaktadır:



Azot oksit (NO_x) emisyonları ise sıcaklık gibi motor karakteristiklerine ve yanma odası atmosfer giriş koşullarına bağlı olup hem iniş- kalkış hem de diğer uçuş fazlarında meydana gelmektedir.

NO oluşumu için kimyasal tepkime $\text{N}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{N}$ şeklindedir. Oksijen atomlarının mevcut olduğu yanma bölgelerinde NO oluşmaktadır. Reaksiyon ve oksijen atomu konsantrasyonu sıcaklığa oldukça bağlıdır ve NO sadece en yüksek sıcaklık bölgelerinde oluşur. Kompresör basınç oranı ve uçuş hızının bir fonksiyonu olan itki kuvveti arttıkça yanma odasında alev sıcaklığı artar bu noktadan sonra azot oksitler de artmaya başlar. Yanma odasında sıcaklıkla-termal NO_x oluşumu ile birlikte; prompt denilen (ani NO_x) ve yakıt bazlı NO_x oluşumu da gerçekleşmektedir. Yakıtla bağlı azot bileşiklerinin yüksek sıcaklıkta azot oksitlere dönüşüm mekanizması yakıt kaynaklı azot oksit oluşumudur. Ani NO_x oluşumunda; havanın içindeki azot molekülleri, alevin içinde bulunan serbest hidrojen ve karbon radikalleri yardımı ile NO_x moleküllerine dönüşür. Yanma odasında en çok gerçekleşen NO_x oluşum mekanizmasında ise yanma odası birincil bölgesinde yüksek sıcaklıklarda havadaki azot molekülleri, oksijenle doğrudan tepkimeye girerek, azot oksit moleküllerini oluştururlar (bu reaksiyona Zeldovich reaksiyonları da denir) (Bowman, 2000; Müezzinoğlu, 2000). NO_2 ise sıcaklığın kısmen düşük olduğu yanma bölgelerinde, dış ortam havası ile temas halinde olan türbin ve egzoz bölümlerinde oluşmaya başlar. Yanma odası sıcaklığının düşük olduğu rölanti fazında NO_2 daha yüksek miktarlardadır.

Uçak motorunda itki artırıldığında yakıt-hava oranının artmasının yanı sıra, yanma sırasında giriş sıcaklığı ve basıncı da artar. Artan yakıt akışı ve sıcaklık nedeni ile yakıt atomize olur ve yüksek yanma odası giriş sıcaklığı yakıtta daha çabuk buharlaşmaya olanak sağlar. Yüksek alev sıcaklıklarında yakıt-hava

oranının daha fazla olduğu durumda CO ve HC tüketiminden sorumlu kimyasal reaksiyon hızı da fazladır. Sonuç olarak, HC ve CO motor emisyonları reaksiyonun tam olarak gerçekleşemediği itki kuvvetlerinde fazla olmaktadır.

Yakıt bileşenleri sadece hidrokarbon olmayan, petrol bazlı yakıtlar karbon ve hidrojenin yanında az miktarda da olsa kükürt içerir. Yanma sırasında okside olan kükürt bileşiklerinden SO₃ ve SO₂ açığa çıkar. Kükürt miktarı tamamen yakıtın safsızlığına ve sülfür içeriğine bağlıdır. Bunun yanında, kükürt dışında metal oksitleri açığa çıkar. Bu bileşikler partikül maddeler olarak nitelendirilir.

2.4. Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonların Atmosfer ve Sağlık Etkileri

Hava taşımacılığının küresel ve ülke ekonomisine sağladığı sosyal ve ekonomik getirilerin yanında, bu sektörden kaynaklanan kirletici emisyonların çevre üzerindeki yerel ve küresel etkilerini de dikkate almak gereklidir. Uçaklardan atmosfere yayılan ana kirleticiler; karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x), su buharı, metan olmayan uçucu organik bileşikler (VOC), hidrokarbonlar (THC), karbon monoksit (CO), kükürt oksitler (SO_x), ya da duman ve diğer partikül maddelerdir. Bu kirletici emisyonların çevresel ve hava kirliliği etkileri, bunların bırakıldığı yüksekliğe oldukça bağlıdır.

Uçaklardan kaynaklanan kirletici emisyonların yerel etkileri özellikle yer seviyesinde önemli olmaktadır ve hava alanı hava kalitesine etki etmektedir. Hava trafiğinin bu etkileri nedeni ile şehir merkezlerinde yüksek kirletici seviyeleri tespit edilmektedir (Yu ve ark. 2004; ICAO, 2013a)

Uçak motorlarında yüksek yakıt tüketimi nedeni ile yüksek irtifada üretilen gazlar atmosferin doğal özelliğinin ve konsantrasyonun değişmesine neden olarak önemli kirletici etki yaratmaktadır. Atmosferde CO₂ ve H₂O konsantrasyonunun artması ile birlikte küresel hava sıcaklığının artması, iklim değişikliği, yeryüzünün tümüne etki etmekte olup çok şiddetli kasırgalar, yağışlar, seller, buzulların erimesi ve aşırı kuraklık gibi farklı ekstrem meteorolojik olayların meydana gelmesine etki etmektedir. Dünyada fosil yakıtlardan atmosfere salınan CO₂'nin %2-3'ünün havacılık kaynaklı olduğu tahmin edilmektedir ve uçaklardan salınan CO₂ emisyonları miktarında yılda % 3-4 artış

olacağı beklenmektedir (ICAO, 2013b). Ayrıca uçağın yüksek irtifa uçuşu sırasında salınan NO_x emisyonları atmosferde ozon artışına neden olarak küresel ısınmaya dolaylı yoldan katkı sağlamaktadır (IPCC, 1999; EPA, 2012).

ABD Çevre Koruma Ajansı Temiz Hava Planı (USEPA Clean Air Act) nın 1970’de yayınladığı raporunda düzenlenmesi gereken kirleticileri, sağlık ve çevresel hava kalitesine etkileri nedeni ile temel kirleticiler olarak belirlemiştir. Bu kirleticiler CO, HC, SO_2 , PM, NO_x , fotokimyasal oksidantlar (PAN-peroksi asetil nitrat, O_3 -ozon) ve kurşun olmak üzere yönetmeliklerde ve standartlarda yer almıştır (Bishop, 2000). Bu kirleticilerden ICAO’da sertifikasyon ve yönetmelik standartlarında düzenlemeler getirilenler ve bu çalışma kapsamında ölçülen emisyonların çevresel ve sağlık etkileri aşağıda anlatılmaktadır.

2.4.1. Azot oksitler (NO_x)

Azot gazı atmosferde en fazla bulunan gazdır. Azot atomları oksijen atomları ile birleşerek azot oksitleri (NO_x) oluştururlar. Bunlardan azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) derişimleri atmosferde fark edilebilir büyüklükte bulunur. Bu gazlardan en zararlı olanı NO_2 ’dir ve NO daha çok NO_2 ’nin oluşumunda rol oynadığı için önem taşır. Yanma kaynaklı NO_x emisyonlarının büyük bir kısmı (yaklaşık %95’i) NO, geri kalanı da NO_2 olarak atmosfere verilir. Atmosferde NO hızla NO_2 ’ye dönüştüğünden azot oksit emisyonları NO_2 cinsinden hesaplanır. Her iki gaz da doğal azot çevriminin birer parçasıdır. Azot oksitlerin havada kalma süreleri saatler mertebesindedir.

Azot, yedi çeşit oksit meydana getirmekle birlikte bunlardan hava kirletici olarak en önemli iki tanesi azot monoksit (NO) ve azot dioksit (NO_2) dir. Bunlar birlikte ($\text{NO}+\text{NO}_2$) NO_x olarak belirtilir (Müezzinoğlu, 2000). Azot oksit oluşumunu etkileyen birçok faktör bulunmasına rağmen iyi bir yanma sonucunda sıcaklık yükselir ve sıcaklık 1800°K ’nin üzerine çıktığı zaman ve buna bağlı olarak da oksijen moleküllerinin ayrılması ile beraber NO_x oluşum hızı da artmaktadır (Nevers, 2000; Heywood, 1988).

Doğal NO_x kaynakları şimşek ile topraktaki biyolojik ve biyolojik olmayan proseslerdir. Azot oksitlerin önemli yapay kaynakları ise, elektrik

üretimi, yüksek sıcaklıkta meydana gelen endüstriyel yakma işlemleri, ulaşım ve evsel ısınmadır. İç ortam kaynakları olarak da sigara kullanımı ile elektrikli veya gaz yakıtların kullanıldığı ısınma ya da yemek pişirme için kullanılan ekipmanlar ön plana çıkmaktadır. Kentsel bölgelerde NO_x emisyonlarının oluşumunda ulaşım en önemli kaynak olarak görülmektedir. Azot oksitler asit yağışlarına katkılarının yanı sıra ikincil formdaki inorganik partiküllerin (özellikle amonyum nitrat) ve fotokimyasal sisin oluşumunda da başlıca etkenlerden sayılırlar (Karpuzcu, 1994; Wark ve ark., 1998; Müezzinoğlu, 2000). Yer seviyesinde oluşan fotokimyasal sis nedeniyle havada görüş mesafesi azalır ve kentler üzerindeki atmosferde risk yaratır.

NO₂ havanın içinde bulunan nem ile birleşerek nitrat asidine dönüşür ve bu asidin de canlıların sağlığı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Azot oksit emisyonları atmosferde nitrik asit (HNO₃) oluşumuyla sonuçlanan zincirleme reaksiyonları tamamlarlar. Aşağıdaki denkleme göre NO hava ile temas ederken kısa zamanda NO₂'ye dönüşür ve NO₂ suda kolay çözünerek nitrik asit çözeltisi oluşturabilir. Atmosferdeki HNO₃ ise aşağıda verilen reaksiyonlar ile oluşmaktadır olup, asit yağmurlarına neden olmaktadır (Nevers, 2000):



Kararlı ve kararsız olan azot oksit bileşikleri atmosferdeki oksitleyici maddelerle reaksiyona girer ve güneş ışığını absorblayarak yanmamış hidrokarbonlarla birlikte verdiği kimyasal reaksiyonlar sonucu fotokimyasal sis oluştururlar. Fotokimyasal sis özellikle kentler üzerinde kızıl kahverengi sis oluşturarak görüş mesafesini azaltır (Nevers, 2000).

Azot dioksit gaz halinde bulunduğu için solunum yolu ile canlıların sağlığı üzerinde birçok etkileri bulunmaktadır. Gaz halinde bulunan azot dioksit solunum yolu ile alındığı zaman canlıların solunum yollarında birikerek, alt solunum yollarına zararlı etkiler meydana getirmektedir (DSÖ, 2013; EPA, 2012). NO₂ kızıl, kahverengi bir renge sahip olup havada 1 ppm in üstünde bulunduğu hava kütlelerini renklendirmektedir. 1,5 ppm den başlayarak solunum yollarında rahatsızlık hissi, 15 ppm den sonra göz yanmaları şeklinde etki yaratmaktadır

(Müezzinoğlu, 2000). Çok yüksek NO₂ konsantrasyonlarına (150-200 ppm) maruz kalındığında, NO₂'nin akciğer dokusunun hasar görmesine neden olduğu tespit edilmiştir. NO ve NO₂ gazlarının her ikisi de akciğerlere taşınarak hemoglobini inaktive eder. NO'nun NO₂'ye göre hemoglobinle bağlanma eğilimi daha azdır, bu yüzden de NO₂'nin sağlık açısından riski NO'ya göre daha fazladır (Stern, 1976). Azot dioksitin bulunduğu ortamlarda diğer kirleticilerin ve özellikle ozonun bulunması durumunda, bu kirleticiler arasında oluşan reaksiyonlar sebebiyle insan sağlığında olumsuz etkileşimler artarak akciğerlerin bakteriyel enfeksiyonlara karşı hassasiyetleri yükselir ve biyokimyasal değişimler meydana gelmektedir (Rigas ve ark. 1997; Morgan ve ark. 1997).

Azot oksitler alt atmosferde VOC'ler ile tepkimeye girerek güneş ışığının etkisiyle ozon kirliliği yaratırlar. Ozona maruz kalma (özellikle çocuklar ve yaşlılar risk grubunda) neticesinde solunum sistemi tahribatına, kronik solunum rahatsızlıklarına –astım gibi- neden olur (EPA, 2012). Troposferin üst kısımlarında ve stratosferin alt kısımlarındaki azot oksit (NO_x) emisyonlarının ozonu arttırması ve metan gazını azaltmasına karşılık; daha yüksek atmosfer seviyelerinde (18 km ve üzeri) azot oksit emisyonlarındaki artışın stratosferik ozon tabakasına etki etmektedir (ICAO, 2013b). Uçakların neden olduğu ozondaki değişiklik, azot oksit gazlarının serbest bırakıldığı yüksekliğe bağlı olup troposferdeki bölgesel ölçekte meydana gelen değişikliklere ve stratosferdeki küresel ölçekteki değişikliklere göre farklılık göstermektedir. IPCC'nin (1999) havacılık raporuna göre atmosferin ozon konsantrasyonunda artışın 2050 yılına kadar %13 dolaylarında olacağı tahmin edilmektedir. Azot oksitlerin troposferdeki metan konsantrasyonunu azaltması neticesinde, dünya yüzeyinde soğumaya neden olmaktadır (IPCC, 1999).

2.4.2. Karbon dioksit (CO₂)

Karbondioksit büyük ölçüde motorlu taşıtların egzoz emisyonları ile beraber bitkiler ile canlıların solunum sonucunda ve enerji üretim tesislerinde yanmış gaz olarak atmosfere girmektedir. Kokusuz ve tatsız bir gaz olan karbon dioksit atmosferin varlığından bu yana atmosferin büyük oranda bileşimini

oluşturur. Karbon dioksit klasik olarak bir kirletici sayılmamakla birlikte; küresel hava sıcaklığına ve iklim değişimine etkileri nedeni ile önemli bir gazdır (Cooper ve Alley, 2002).

CO₂, metan, su buharı ve diğer sera gazları güneş radyasyonunun bir bölümünü tutarak, dünyada canlıların yaşaması için gerekli olan ısıyı dengelemektedir. CO₂ uzun dalga boylu kızıl ötesi ışınları absorbe etme özelliğine sahiptir. CO₂ miktarının artması ile daha fazla kızılötesi ışın absorbe edilerek bu ışınların atmosferin dışına çıkması engellenir. Sera etkisi olarak bilinen bu olay atmosferin daha fazla ısınmasına yol açarak küresel ısınmaya sebep olmaktadır (Bishop, 2000).

Karbon dioksit; atmosferde su buharı ile tepkimeye girerek karbonik asit (H₂CO₃) oluşturmaktadır. Atmosferde, ıslak bazda karbonik asit gazı; asit yağmuru, sis veya kar şeklinde etki yaparken; kuru bazda asidik gaz ve partiküller şeklinde bulunur (Vallero, 2008).

Uçaklarda yüksek yakıt tüketimi nedeni ile en fazla oluşan karbon dioksit gazının atmosferde artışı küresel sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla iklim değişikliği etkisine neden olmaktadır (ICAO, 2013b).

2.4.3. Karbon monoksit (CO)

Yakıtların tam olarak yanmamasından oluşan CO renksiz, kokusuz ve havanın ortalama molekül ağırlığına yakın ağırlıkta bir gaz olup kaynaklandığı yerin etrafında iyi dağılmayan ve varlığı fark edilemeyen zehirli bir yanma ürünüdür. Atmosferde kolayca yok olmayan bir gaz olan CO emisyonlarının atmosferde kalış süresi 2 aydır. Gelişmiş ülkelerde taşıt emisyonları karbon monoksit için önemli kaynaklardır. Şehirlerde toplam CO emisyonlarının yarısından fazlası motorlu karayolu taşıtlarından ve özellikle benzinli otomobillerden kaynaklanabilir. Diğer önemli CO kaynakları, endüstriyel prosesler, konut ısıtılması amaçlı ve endüstriyel yakıt yakılması ve yangınlardır. En yüksek CO derişimlerine genellikle otomobil emisyonlarının daha fazla olduğu ve gece inversiyon koşullarının daha sık görüldüğü kış aylarında rastlanır (Wark ve ark., 1998; Müezzinoğlu, 2000).

Karbon monoksit solunuma karıştığı zaman kanın oksijen taşımalarını büyük ölçüde engelleyerek kandaki oksijen yetersizliği sebebiyle kan damarlarının çeperleri, beyin kalp gibi hassas organ ve dokularda fonksiyon bozuklukları meydana getirmek suretiyle insan sağlığını etkilemektedir. CO hemoglobine bağlandığı zaman kandaki oksijenin yerini alarak kalp ve sinirsel davranış problemlerine yol açmaktadır. Bu gaz zehirleyici bir özelliğe sahip olduğu için vücuda solunum yolu ile girdiğinde kandaki alyuvarlar tarafından absorbe edilerek kan oluşum mekanizması bozulur. Az miktarda teneffüs edilen CO gazı baş dönmesi, bulantı ve görmede bulanıklık meydana getirir ve çok miktarda teneffüs edildiği zaman da öldürücü özellik göstermektedir (Boubel ve ark. 1994).

Uçaklardan kaynaklanan CO alçak irtifalarda havaalanı atmosferini etkilemektedir. Uçakların pistte (ya da apron) rölanti fazı sırasında çalışır halde iken ya da taksi hareketleri sırasında CO konsantrasyonu artarak hava alanı hava kalitesini bozmaktadır (IPCC, 1999).

2.4.4. Hidrokarbonlar (HC)

Karbon ve hidrojen içeren bileşikler (hidrokarbonlar) ve bunların türevleri olarak tanımlanabilen organik bileşiklerden uçucu olanları (UOB), diğer organik bileşiklere kıyasla, daha düşük kaynama noktaları ve daha yüksek buhar basınçlarına sahip olan katı, sıvı veya standart koşullarda gaz/buhar fazındaki maddeleri temsil eder. Uçucu organik bileşikler sınıfına giren binlerce organik kirletici vardır. Bu kirleticiler uçuculuk özellikleri, reaktiviteleri, çözünürlük ve toksisiteleri açısından farklı özelliklere sahiptir. Kütle emisyonları olarak atmosfere en fazla salınan UOB'ler arasında benzen (C₆H₆), toluen, etil benzen, ksilen, formaldehit, metilen klorür ve metil kloroform sayılabilir .

UOB emisyonları, büyük oranda insan faaliyetlerine bağlı olarak meydana gelir. Ulaşım ve çözücü kullanımı önemli UOB emisyon kaynaklarındandır. Birçok UOB konsantrasyonu kapalı ortamda, açık ortamdan daha fazladır ve bu kirleticilerin bina ve işyeri gibi kapalı alanlarda doğrudan etkisi çok daha önemli

olabilir. Bazı uçucu organik bileşikler güneş ışığı varlığında troposfer seviyesinde çok reaktiftir.

Metan (CH₄) ile başlayan bu gruptaki organik maddelerin metan eşdeğeri ile ifade edildiği hafif alkanlardan meydana gelen bir alt grubu mevcuttur. Atmosferdeki hidrokarbonların bazıları sağlığa zararlı etki yaratır. Benzen, aldehit, formaldehit göz ve solunum sistemini tahrip eder. Hidrokarbonlar, havadaki başka kimyasal maddelerle tepkimeye girdiğinde, gözlere ve solunum yollarına zararlı etkileri olur. Az miktarda maruz kalırsa dahi, Benzen gibi bazı hidrokarbonlar kırmızı kan hücreleri ile birleşerek kansere neden olmaktadır (Stern, 1976).

Bu kirleticilerle, atmosferik özelliklerin oluşturduğu kimyasal reaksiyonların en önemlileri ise fotokimyasal olaylardır ki, bunlardan özellikle floroklorokarbonlar, güneşten gelen zararlı UV (ultraviyole) ışınlarına karşı yeryüzünü koruyan ozon tabakasında büyük tahribata yol açmaktadır (IPCC, 1999). Metan gibi hidrokarbonların ve azot oksitlerin stratosferde bulunması durumunda ozonun bozunması hızlanır ve doğal dengeyi bozacak şekilde ozon miktarında net bir azalma meydana gelebilir. Sera gazı olan ozondaki azalma küresel sıcaklıklarda negatif etki yaparak soğumaya neden olur. Ozon tabakasının incilmesi sonucu güneşin zararlı olan ultraviyole ışınlarının radyasyonu insan, hayvan ve bitkileri olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca bu ışınların radyasyonu gözlerde katarakt oluşmasına ve bazı tip deri kanserinde de artışa sebep olmaktadır. Bazı bitki türleri ultraviyole ışınlarına karşı oldukça dayanıklı iken bazıları da çok hassastır. Ultraviyole ışınlarının radyasyonu bazı bölgelerdeki gıda üretimini ciddi bir şekilde etkileyerek, bazı bitkilerin üretim kapasitesini ve bazı ürünlerin kalitesini değiştirmektedir. Artan bu ışınların radyasyonu küçük organizmalar başta olmak üzere su organizmaları üzerinde de olumsuz bir etkiye sahiptir (EPA, 2012)

Gaz haldeki hidrokarbon atmosferdeki fotokimyasal reaksiyonlar sonunda azot oksitlerle reaksiyona girerek ikincil bir hava kirleticisi olan ozon oluşumuna neden olur ve alt atmosferde ozon konsantrasyonunu artırır. Yeryüzüne yakın olan troposfer tabakasında bulunan ozon ise en önemli fotokimyasal bileşendir ve yerel hava kalitesini etkiler (Boubel, 1994).

3. KONU ile İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Uçak motorlarının emisyon testleri; uçakların havada faaliyet gösteren hava araçları olmaları, testler esnasında güvenlik ile ilgili risklerin yüksek olması, uçak işleticilerinin çevresel etki konusuna sadece bir takım zorunluluklar sebebiyle ilgi göstermeleri ve bu tür test işlemlerinin görece pahalı olması gibi nedenlerden dolayı az sayıda ve oldukça dar kapsamlı yapılabilmektedir. Örneğin bunlar arasında en dikkat çekici ve geniş kapsamlı olanı, ICAO tarafından gerçekleştirilen ve turbofan motorların emisyon indisleri ile ilgili veritabanı oluşturulması şeklinde olup sadece fabrika çıkışı motorların standart şartlarda ve belirli sayıda uçuş fazının değerlendirilmesi şeklindedir. ICAO'nun bu çalışmalarını 1970'li yılların sonlarında yapılmaya başlanmış ve eski motorlar için emisyonlar ölçülmüş olup, bu motorlara ait emisyon indislerinden veri tabanı geliştirilmiştir (ICAO emission database). Diğer çalışmalarda ise çoğunlukla ya motorların rölanti değerleri, ya da iniş, kalkış ve taksi gibi yerde geçen uçuş fazları dikkate alınmaktadır.

Uçak emisyonları ile ilgili yapılan emisyon ölçümleri genellikle uçakların pistte veya apronda oldukları durumlarda yapılmıştır. Diğer bir deyişle motorların uçak üzerinde iken üretmiş oldukları emisyonlar üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmalarda bazı gruplar örnek aldıkları gazları incelerken, bazı gruplar da uzaktan ölçüm veya motorun arkasında bir örneklem sistemi yerleştirilerek anlık olarak bu ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Bu şekilde uçuşun özellikle yerde olmak üzere bazı fazlarına ilişkin gerçekçi sonuçlar alınabilmektedir. Bununla birlikte motorun apronda yüksek güçte çalıştırılması yüksek itkidenden dolayı bazı emniyet riskleri doğurduğu için genellikle yüksek güçte emisyon ölçümleri ya yapılamamakta ya da çok limitli şartlar altında yapılabilmektedir. Motor test-cell'lerinde gerçekleştirilen motor çalıştırmalarında ise motorun tüm devirlerde risksiz ve uzun süreler çalıştırılması söz konusu olduğu için bu durum özellikle emisyon üretimlerinin mekanizmaları hakkında çok daha fazla bilgi verebilmektedir.

Motor test-cell emisyon ölçümleri ile ilgili literatürde fazla çalışma bulunmamaktadır. Literatürde bununla ilgili olarak yapılan bir çalışmada General

Electric firmasının FAA için 1980 yılında CF-6 motorları için hazırlamış olduğu bir rapordur. Bu çalışmada 12 adet CF6-50C2 (JP4 yakıtlı); 6 adet CF6-50C2 (Jet A yakıtlı) ve 7 adet CF6-6D (Jet A yakıtlı) testi gerçekleştirilmiştir (Lyon ve ark. 1980). Bu çalışmada kullanılan yöntemin bahsi geçen çalışmadan en önemli farklılığı ilk kez motorun egzoz nozul içerisinden örnek alınabilmiş olmasıdır. Diğer yapılan çalışmalar genellikle motorun belirli bir mesafe arkasından örnek almakta, ancak turbofan motorlarının özelliğinden dolayı yanmış gazlar fandan gelen soğuk hava ile seyrelmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada örnek probun motorun türbinlerinin hemen arkasında bulunması yanmış gazların emisyonlarının, seyrelme etkisi olmadan belirlenebilmesinde önemli bir özgünlük sağlamaktadır.

Yolcu uçağı motorlarının emisyon ölçüm sonuçlarının ve emisyon indislerinin hesaplandığı bu tez çalışmasında büyük ölçüde, ICAO Annex 16 Volume II- Aircraft Engine Emissions Measurement (ICAO, 2008) standartları kullanılarak emisyonlar ölçülmüştür. Bu tez kapsamında uçak motorları emisyonlarının farklı yöntemler kullanılarak ölçüldüğü çalışmalara ve emisyon indislerinin bulunmasına yönelik olarak bir literatür araştırmaları gerçekleştirilmiş ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

3.1. Küresel/ Bölgesel Emisyon Envanteri ile İlgili Çalışmalar

Yakıt tüketimi ve HC, CO, NO_x, CO₂ ve SO₂ emisyonları miktarlarının hesaplanması ile ilgili bir çalışma Fan ve ark. (2012) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada Çin'de 29 havayolunun 2010 yılı iç hat uçuşlarında toplam yakıt tüketimi ve toplam yıllık HC, CO₂, NO_x, CO ve SO₂ emisyon miktarları hesaplanmıştır. Hesaplanan emisyon miktarlarına göre emisyon envanteri oluşturulmuştur. Emisyon miktarlarının hesaplanmasında kullanılan girdiler uçuş programı veritabanı (havayolu şirketinden alınan gerçek uçuş verileri), uçak motoru üreticisinden uçak/ motor kombinasyonu özellikleri, ICAO veri tabanından alınan emisyon indislerinin meteorolojik verilere bağlı revizyonu ve varsayımlardır. LTO fazındaki emisyonlar ICAO veritabanından yararlanılarak, yüksekte irtifa sırasındaki yakıt tüketimi ise ICAO veri tabanındaki referans

atmosfer koşullarında düzeltme yapılarak bulunmuştur. Yakıt akışının hesaplanması, emisyon indislerinin revizyonu ve emisyonların hesaplanmasında Boeing Fuel Flow-2 Metodu (BFFM2) kullanılarak HC, CO ve NO_x emisyonları hesaplanmıştır. CO₂ ve SO₂ emisyonları yakıt kompozisyonuna bağlı olarak hesaplanmıştır. Çalışmada çeşitli motor tipleri için yakıt tüketimi ve her motor tipinden kaynaklanan emisyon miktarları da bulunmuştur. 2010 yılı Çin havayollarında iç hat uçuşlarında yakıt tüketiminin 12,12 milyon ton, HC, CO, NO_x, CO₂ ve SO₂ emisyon miktarları sırası ile 4600 ton, 39700 ton, 154100 ton, 38,21 milyon ton ve 9700 ton olduğu ifade edilmektedir .

Uçakların rölanti fazındaki dört ayrı evresinde tüketilen yakıt tüketimi ve emisyon Dallas/Fort Worth Uluslararası Hava Alanı'nda 6 Ekim ve 7 Kasım 2008 günlerini kapsayan bir çalışma ile bulunmuştur. Havaalanı taksi yolundaki evrelerini oluşturan 4 evrede; durma, dönme, hızlanma ve sabit hızda hareket ya da frenleme harcanan süreler ve her evrede ayrı ayrı yakıt tüketimleri hesaplanmış, ICAO'daki referans koşullar varsayılarak her evrede yakıt tüketimine bağlı emisyonlar bulunmuştur. ICAO veri tabanından alınan itki gücüne göre (4 evre için %7 itki gücü referans alınmıştır) taksi yakıt akışı ekstrapolasyonla bulunarak her evrede harcanan sürelerin çarpılması ile yakıt tüketimi her 4 evre için hesaplanmıştır. Bu evreler için emisyon indisleri ile yakıt tüketimi çarpıldıktan sonra sonuç atmosferik koşullara çevrilerek her evrede salınan emisyon miktarları hesaplanmıştır. Yakıt tüketiminin %18'i durma ve hızlanma fazlarında olmuştur. Ayrıca çalışmada havaalanına varan uçağın durması boyunca emisyon salımı ve yakıt tüketiminin havaalanından kalkışından daha az olduğu ifade edilmektedir. En yüksek emisyon indisinin en düşük itki gücü seviyelerinde uçak durdurulacağı zamanda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Rölantide ve taksi fazlarında sabit hızda en fazla yakıt tüketimi ve emisyon salımının olduğu ifade edilmektedir (Nikoleris ve ark., 2011).

Heland ve Fer'in (1998) çalışmasında, uçak egzoz CO₂, H₂O, CO, NO ve NO₂ gibi temel yanma ürünlerinin belirlenmesi için FTIR spektroskopi uygulanarak emisyonlar tespit edilmiş ve literatürde yayınlanan diğer değerlerle karşılaştırılmıştır. CFM56-3 motorun rölanti itkisinde ölçülen CO emisyon indisi Spicer ve ark. (1984) tarafından verilen değerden yaklaşık %27 daha düşük ve

CFM56-3 motorları bütünü için ICAO verilerine göre yaklaşık %27-48 daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Airbus A340'ta kullanılan bir CFM56-5C2 motorun rölanti güçte ölçülen CO emisyonu indisi ICAO değerinden yaklaşık olarak %30 daha az olduğu belirtilmiştir.

3.2. Havaalanı Yakın Çevresi ile İlgili Etki Değerlendirme Çalışmaları

Kesgin'in (2006) ICAO emisyon veri tabanı LTO emisyon indisleri ve yakıt akışlarını kullanarak minimum ve maksimum yakıt tüketimine bağlı Atatürk Havalimanını da içeren Türkiye'deki büyük havaalanlarında toplam LTO emisyonlarını hesapladığı çalışmasında LTO fazı toplam emisyonları 7614,34 ile 8338,79 ton/yıl arasında hesaplanmıştır. Yine aynı çalışmada taksi (rölanti) fazı süresindeki 2 dakikalık bir azalma, LTO emisyonları toplamında %6 azalma sağlamıştır. Atatürk Hava Limanında uçakların LTO fazı toplam emisyon miktarı 3777,64 ile 4253,97 ton/yıl'dır. Karışma yüksekliği altındaki uçuş fazları (LTO) emisyonların büyük bir miktarını oluşturmaktadır. Elbir'in (2008) çalışmasına göre LTO döngüsü toplam CO emisyonlarının %78'i, toplam HC emisyonlarının %73'ü taksi (rölanti) fazı sırasında salınmaktadır. Toplam NO_x emisyonlarının en büyük oranı %40 değeri ile tırmanış fazına aittir. Elbir (2008), Adnan Menderes Havalimanı 2004 yılı uçuşları için havaalanı uçuş kayıtları ve ICAO emisyon veri tabanı emisyon indislerini kullanarak NO_x, CO ve HC emisyonlarını 197, 138 ve 21 ton/yıl olarak hesaplamıştır.

Hava alanlarının hava kalitesi ve halk sağlığına etkisinin araştırıldığı bir çalışmada (Yim ve ark. 2013) İngiltere havaalanlarının emisyonları ve 2030 emisyon senaryoları geliştirilmiştir. Çalışmada Londra Heathrow havaalanı baz alınmıştır. Çok ölçekli yaklaşımla uçakların havaalanı hava kalitesine ve insan sağlığına etkileri tahmin edilmiştir. İngiltere havaalanı emisyonları envanteri, iniş ve kalkış uçuş operasyonları, APU (auxilliary power unit: yardımcı güç ünitesi) ve yer destek elemanlarından (Ground Support Equipments) kaynaklanan emisyonlar model yardımı ile bulunmuştur. Çok ölçekli hava kalitesi modeli geliştirilerek hava kalitesi incelenmiştir. Bu modele ek olarak meteorolojik model, kimyasal taşınım ve dağılım modeli çalışmada kullanılmıştır

ICAO standart süreleri (TIM-Time in mode) ve yakıt tüketimi değerleri kullanılarak yapılan bir çalışmada Avustralya Brisbane Havaalanı için emisyon envanteri oluşturulmuştur. 2006-2007 arasında iki yıllık süre için en yaygın kullanılan ticari uçakların (Boeing ve Airbus) iç hat ve dış hat uçuşları LTO $PM_{2.5}$, partikül sayısı ve NO_x emisyonları hesaplanmıştır (Mazahari ve ark. 2011).

PM emisyonları ile ilgili bir çalışma Lobo ve ark. (2012) tarafından yapılmıştır. Oakland Uluslararası Havaalanında gerçek zamanlı ölçümler ile CFM56-3B ve -7B, V2500, JT-8D, CF6-80 ve -50 ve CF34-3B tipi motorlarda on-wing (apron) durumunda motordan 100-300 m arası uzaklıkta emisyon ölçüm sistemi ile ölçülmüş ve LTO emisyon indisleri belirlenmiştir.

Schafer ve ark. (2003) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada uzaktan algılama (remote sensing) metodu kullanılmıştır. Frankfurt, Londra ve Viyana Havaalanlarında 140'ın üzerinde uçak için rölanti emisyon değerleri tespit edilmiştir. Bu emisyonlardan CO, CO_2 ve NO için Fourier transform infrared (FTIR) absorpsiyon spektrometresi ve NO ve NO_2 için differential optical absorption spectrometry (DOAS) yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar ICAO veri tabanındaki değerlerle karşılaştırılmıştır.

Uzaktan algılama (remote sensing) yöntemi ile askeri uçakların T33, T56 turbofan ve T700 motorlarında emisyonlar ölçülmüştür. Uçağın apronda farklı motor güçlerinde çalıştırıldığı sırada ölçümü gerçekleştirilip, ölçüm probu egzoz çıkışının 35 m uzağına yerleştirilmiştir. PM, kükürt bileşikleri, karbon partiküller, ölçülmüş ve CO_2 , NO, CO, NO_x gaz emisyonları için emisyon indisleri geliştirilmiştir (Cheng ve Corporan, 2010). PM ölçüm probu ve uzaktan algılama yöntemi ile askeri C-130 uçağının on-wing durumunda emisyonlarının ölçüldüğü çalışmada Cheng ve ark. (2008) uçak egzozuna farklı mesafelerden (PM ölçümü için egzoz çıkışına 15 m, gaz emisyonlar için 5 ve 15 m uzaklıktan) ölçümler gerçekleştirmişlerdir.

Klapmeyer ve Marr (2012) Virginia Roanoke Bölgesel Havaalanında kullanımda olan uçakların ve diğer havaalanı aktivitelerinin CO_2 , NO_x ve PM, BC (black carbon) emisyon miktarlarını ölçmüşlerdir. Geliştirilen emisyon indisleri ile ICAO taksi ve kalkış emisyon indisleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca

CO₂ ve NO_x konsantrasyonunun daha çok atmosferik koşullardan etkilendiği, PM konsantrasyonunun ise uçak faaliyetlerinden etkilendiği ifade edilmiştir.

Ekici ve ark. (2013) yapmış olduğu çalışmada Türkiye’ de en yoğun 5 hava alanının yıllık LTO döngüsü HC, NO_x ve CO emisyonları hesaplanmıştır. Devlet Hava Meydanları İşletmesi (General Directorate of State Airports Authority) 2012 iç hat uçuşları, EUROCONTROL ortalama taksi süresi ve ICAO veri tabanı emisyon indisleri emisyon hesaplamalarında kullanılmıştır. Çalışmaya göre 2012 yılı CO, HC ve NO_x emisyonları 1.483, 215 ve 1.417 ton/yıl olarak bulunmuş ve en fazla kirletici emisyon oranına sahip havaalanının İstanbul Atatürk Havaalanı olduğu belirtilmiştir.

3.3. Model Bazlı Envanter Çalışmaları

Model bazlı yapılan çalışmalardan, Rismann ve ark. (2013) yaptığı çalışmada uçak emisyonlarının etkisini incelemek için dünyanın en yoğun havaalanı olan Atlanta Havaalanı’nda LTO emisyonlarını Advanced Modelling System for Transport, Emissions, Reactions and Deposition of Atmospheric Matter (AMSTERDAM) modelini kullanarak değerlendirmişlerdir. Haziran-Temmuz 2012 döneminde PM_{2.5} konsantrasyonlarına maruz kalmalarda sağlık etkileri tespit edilmiştir.

Song ve Shon (2012), Kore’de 4 farklı hava alanı için 2009-2010 yıllarını kapsayan çalışmasında uçaklardan kaynaklanan sera gazları ve hava kirleticilerini EDMS “Emission and Dispersion Modeling System” ile tahmin etmişlerdir. Yurtiçi ve uluslar arası uçuşların LTO fazlarını ve yer destek elemanlarını da kapsayan çalışmada ortalama yıllık sera gazları (CO₂, N₂O, CH₄ ve H₂O) 4 havaalanı için toplam 1.11×10^3 , 1.76×10^2 , 1.85×10^{-3} ve 3.84×10^8 kt/yıl olarak bulunmuştur. NO_x, CO, VOC ve PM emisyonları ise 5.20, 4.12, 7.46×10^{-1} ve 3.37×10^{-2} kt/yıl olarak hesaplanmıştır. Thomas (2013) çalışmasında Teksas Corpus Christi Uluslararası Havaalanı için uçak emisyonlarının yerel hava kalitesine etkilerini belirlemiştir. 2005-2011 yılları arasında ticari uçakların uçuşları ele alınarak Emisyon and Dispersion Modelling System (EDMS) yazılımı kullanılıp emisyonlar hesaplanmıştır. Ekonomik, iklimsel ve antropojenik indisler

emisyon tahminlerinde ele alınmış ve ICAO emisyon veri tabanındaki emisyon indisleri ve yakıt akışları kullanılmıştır.

Yunanistan havaalanları için 1980-2005 yılları arasında uçaklardan kaynaklanan emisyonlar EMEP/CORINAIR metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışmada sivil havacılıkta kullanılan bütün uçak türlerinin iç ve dış hat uçuşları LTO döngüsü emisyonları bulunmuştur. 38 havaalanı için hava trafiği arttıkça emisyonlarda artış olduğu, NO_x emisyonlarındaki artışın VOC ve CO emisyonlarındaki artışa göre daha fazla olduğu, VOC ve CO emisyonlarındaki artışın 1980'den 2005 yılına azalma eğilimi gösterdiği, SO₂ ve PM_{2.5} emisyonlarındaki artışın stabil olduğu tespit edilmiştir (Tsilingiridis, 2009).

Havacılık emisyonlarının iklimsel ve atmosfer kimyasına etkisini ortaya koymak adına yapılan çalışmada MOZART 3.1 kimyasal taşınım modeli kullanılmıştır. Üst troposferde ve alt stratosferde uçak emisyonlarının etkisi incelenmiştir (Lee, 2012).

3.4. Diğer Deneysel Çalışmalar

Pollution From Aircraft Emissions in the North Atlantic Flight Corridor (POLINAT) projesi kapsamında 7 adet uzun menzilli subsonik uçağın egzoz lüle kısmına yakın bir yerden yerinde ölçümlerle NO, NO_x ve CO₂ bileşenlerinin hacimsel karışım oranları ölçülmüştür. Uçakların irtifaları 9.1 km'den 11.3 km'ye, Mach sayılarının 0.77'den 0.85'e değişmesinin ölçümlerde konsantrasyonlara etkisi incelenmiştir. Elde edilen emisyon ölçüm sonuçlarına göre 7 adet uçağın emisyon indisleri hesaplanmıştır. Böylelikle irtifa şartlarında uçağın emisyon indisleri elde edilmiştir. Emisyon indisleri hesaplamalarında Boeing Flow Method-2 kullanılmıştır (Schulte ve ark. 1997).

RB211-535-E4 turbofan motorunda rölanti ve %60 itki için egzoz emisyonları kromatografik yöntemle Anderson ve ark. (2006) tarafından incelenmiştir. Emisyonların itkiye büyük ölçüde bağlı değiştiği belirlenmiştir. Çalışmada daha yüksek güç oranında düşük güç oranına nazaran karbon emisyonlarının daha az oluştuğu belirlenmiştir.

Spicer ve ark. (2009) tarafından art yanmalı (afterburner) F-15 askeri uçağı ve C-130 kargo uçağının tehlikeli ve reaktif 60'dan fazla organik gaz emisyonları ölçülmüştür. Emisyon ölçüm probu uçağın egzozundan 14.3 m uzaklığa yerleştirilerek, rölantiden maksimum güce kadar yer seviyesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda CO₂, CO, NO ve NO_x emisyon indisleri geliştirilmiştir.

Timko ve ark. (2010) tarafından yapılan önemli çalışmalar kapsamında CFM56 tip motorların 9 ayrı versiyonu ile Rolls-Royce ve Pratt-Whitney üretimi diğer bazı motorların uçak üzerinde emisyon testleri gerçekleştirilmiş ve NO, NO₂, NO_x, CO, HCHO ve C₂H₄ ile uçucu organik bileşiklerine ait emisyon salımları belirlenmiştir. Bu çalışmada ölçüm noktası olarak motorun egzozundan itibaren 1-15 m arasında değişen noktalar seçilmiştir. Emisyonların itkiye bağlı değişimlerini yakıt akışı ve yanma odası giriş atmosfer koşulları gibi bağımsız değişkenlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca kalkış itkisinin meydana getirdiği yüksek itki nedeni ile kalkış ölçümü yerine %85 güçteki tırmanış itkisinin emisyonları ölçülebilmektedir. Çalışmada ayrıca kalkış hariç ICAO'nun diğer motor test rejimlerine bağlı kalınmıştır. Agrawal ve ark. (2008) CFM56-7 ve CFM56-3 turbofan motorları için farklı motor güç oranında emisyonların partikül ve kimyasal karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir.

Yolcu taşımacılığı ve özel amaçlar için kullanılan farklı üretici firmaların turbofan ve turbojet motorlarından kaynaklanan NO_x, CO ve HC emisyonlarının incelendiği çalışmada, ICAO verileri kullanılarak motor emisyonlarının yakıt akışı ve motor itkisi ile değişimleri belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada Jet A yakıtı ile biodizel olarak Metil Bütanolün farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışımli yakıtın CF6-80C gaz türbinli turbofan motor emisyonuna etkisi incelenmiştir. NO_x emisyonunun çalışmada incelenen motorlar için, yakıt akış miktarının artması ile arttığı belirlenmiştir. CO ve HC emisyonlarının ise; NO_x emisyonunun tam tersine çalışmada kullanılan motor tipleri için, yüksek güçlerde düşük güçlere nazaran çok daha az seviyelerde olduğu tespit edilmiştir (Yılmaz ve İlbaş, 2012).

Yakıt bazlı emisyon özelliklerinin belirlenmesi amacı ile Mendez ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmada bütanol alternatif enerji yakıtı olarak, Jet A

yakıtına eklenmiş ve türbin motorlarında kullanılmış; uçak motoru çalışma performansına ve emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Saf Jet A, bütanol ve iki yakıtın karışımı belirli konsantrasyonlarda %25'den %75'e değişen hacimlerde yakıt olarak kullanılmıştır. Bu yakıt karışımlarının itkiye, itkiye bağlı yakıt tüketimine, türbin giriş ve egzoz gazı sıcaklığına, emisyon özelliklerine etkileri irdelenmiştir. Çalışmada kullanılan yakıtın CO ve NO_x emisyonlarına etkileri emisyon indisleri hesaplanarak bulunmuştur.

CFM56-2B1 motorunda ince partikül ve organik buhar emisyonlarının ölçüldüğü çalışmada motorun egzoz çıkışı 1 m uzağına yerleştirilen prob ile ölçümü yapılmış, Gaz ve partikül bazlı emisyonlar gaz kromatografi/kütle spektroskopisi (GC-MS) ile ölçülmüştür. Organik buhar emisyonların %4 itkide en fazla olduğu ve itki arttıkça VOC'lerin azaldığı tespit edilmiştir (Presto ve ark. 2011).

Garnier ve ark. (1997) tarafından Boeing 767 ve 744 uçaklarının egzoz çıkışından 1, 30, 100 ve 1000 m uzaklıklarda emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. AERONOX projesinin bir parçası olan çalışmada aktif kimyasal türlerin (NO, NO₂, HNO₂, HNO₃ ve H₂SO₄ gibi) dağılımını ve potansiyel taşınımın incelenmiştir. Farklı mesafeler boyunca sıcaklık değişimi ve emisyonların seyrelme profili ele alınmış ve karşılaştırılmıştır.

Los Angeles Havaalanında kalkış faaliyetleri sırasında UFP'lerin (ultra fine partikül) dağılımları ve konsantrasyonları, siyah karbon, PM_{2.5} kütlesi ve kimyasal bileşikler ölçülmüştür. Uçağın kalkış noktasından 610 m uzaklığa kadar 5 farklı konumda ölçümler gerçekleştirilmiştir. En büyük PM çapının 14.5 nm olduğu tespit edilmiştir (Zhu ve ark. 2011).

Deneysel çalışmalar haricinde sivil havacılıkta yüksek yakıt tüketimi ve buna bağlı CO₂ emisyonlarını belirlemek amacıyla yapılan bir çalışmada; yakıt azaltım yaklaşımları, uçak teknolojilerinin geliştirilmesi, motor verimi vb. yaklaşımlarla CO₂ salımının azaltılabileceği ile ilgili öneriler geliştirilmiştir (Grote ve ark. 2014). Havacılığın çevresel etkilerinin azaltılmasında uçak operasyonlarında yapılacak değişikliğin potansiyel etkisini görmek adına yapılan çalışmada dünyadaki büyük hava alanlarındaki uçakların rölanti sürelerindeki azalmanın yakıt tüketimine olan etkisi ve buna bağlı emisyonlardaki değişim

incelenmiştir. Rölanti fazı sırasında motorun çalıştırma ve durdurma arasındaki sürenin değişmesinin emisyonlar üzerindeki etkisi, varış süresinin yakıt tüketimine etkisi sayısal olarak ortaya konulmuştur (Uday, 2011). Literatür taramasının bir özeti Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Literatür özeti

Test edilen motor/ Havaalanı	Ölçülen emisyonlar/ Emisyon indisleri	Yöntem/ örneklem sistemi	Test koşulları	Referans
7 adet uzun menzilli subsonic uçak	NO, NO _x ve CO ₂	Boeing Fuel Flow Method-2	-	Schulte ve ark. (1997)
CFM56-3, CFM56-5C2	CO ₂ , H ₂ O, CO, NO ve NO ₂	FTIR (fourier transferred infrared) spektroskopi yöntemi.	-	Heland ve Fer (1998)
Çin’de 29 havayolu iç hat uçuşları	HC, CO, NO _x , CO ₂ , SO ₂ emisyonları	Uçuş program veritabanı, ICAO emisyon indisleri Boeing Fuel Flow Metodu 2	Havaalanı rölanti yolundaki evrelerini oluşturan 4 evrede; durma, dönme, hızlanma ve sabit hızda hareket ya da frenlemede harcanan süreler ve yakıt tüketimleri	Fan ve ark. (2012)
Dallas/ Fort Worth Uluslararası Havaalanı	-	ICAO referans koşulları ve yakıt tüketiminden rölanti evresindeki emisyonlar	-	Nikoleris ve ark. (2011)
İstanbul Atatürk Havalimanı	LTO fazı toplam emisyonlar	ICAO veri tabanı LTO emisyon indisleri ve yakıt akışları	-	Kesgin (2006)
İzmir Adnan Menderes Havalimanı	NO _x , CO ve HC emisyonları	2004 yılı uçuşları için havaalanı uçuş kayıtları ve ICAO emisyon veri tabanı emisyon indislerini kullanarak emisyonlar hesaplanmıştır.	-	Elbir (2008)
Londra Heathrow havaalanı	Uçakların havaalanı hava kalitesine ve insan sağlığına etkileri	LTO uçuş operasyonları, APU ve yer destek elemanlarından kaynaklanan emisyonlar model yardımı ile bulunmuştur.	-	Yim ve ark. (2013)

Çizelge 3.1. (Devam) Literatür özeti

Test edilen motor/ Havaalanı	Ölçülen emisyonlar/ Emisyon indisleri	Yöntem/ örneklem sistemi	Test koşulları	Referans
Avustralya Brisbane Havaalanı iç ve dış hat uçuşlarında kullanılan Airbus ve Boeing ticari uçakları	LTO PM _{2,5} , partikül sayısı ve NO _x emisyonları	ICAO standart süreleri ve yakıt tüketimi değerleri kullanılarak	-	Mazaheri ve ark. (2011)
Oakland Uluslararası Havaalanı/ CFM56-3B ve -7B, V2500, JT- 8D, CF6-80 ve -50 ve CF34-3B	PM emisyonları ve emisyon indisleri	Motor on-wing durumda emisyon ölçüm sistemi ile	Motordan 100-300 m arası uzaklıkta emisyon ölçüm sisteminde gerçek zamanlı ölçümler ile	Lobo ve ark. (2012)
Frankfurt, Londra ve Viyana havaalanlarında 140 ^m üzerinde uçak için	CO, CO ₂ , NO ve NO ₂ emisyonları ve emisyon indisleri	Uzaktan algılama yöntemi, CO, CO ₂ ve NO için Fourier transform infrared (FTIR) absorption spectrometry, ve NO ve NO ₂ için differantial optical absorpsiyon spektrometre	-	Schafer ve ark. (2003)
T33, T56 turbofan ve T700 askeri uçakları	PM, kükürt bileşikleri, karbon partiküller ölçülmüş ve CO ₂ , NO, CO, NO _x emisyon indisleri	Uzaktan algılama	Apronda farklı motor güçlerinde çalıştırıldığı sırada ölçümü gerçekleştirilip, ölçüm probu egzoz çıkışı 35 m uzağına yerleştirilmiştir.	Cheng ve Corporan (2010)
C-130 askeri uçağı	PM ve diğer emisyonlar	PM ölçüm probu ve uzaktan algılama	On-wing durumunda PM ölçümü için egzoz çıkışı 15 m, emisyonlar için 5 ve 15 m	Cheng ve ark. (2008)
Virginia Roanoke Bölgesel Havaalanı	CO ₂ , NO _x , PM, BC (karbon siyahı) emisyonları ve indisleri	-	-	Klapmeyer ve Marr (2012)

Çizelge 3.1. (Devam) Literatür özeti

Test edilen motor/ Havaalanı	Ölçülen emisyonlar/ Emisyon indisleri	Yöntem/ örneklem sistemi	Test koşulları	Referans
Türkiye’de en yoğun 5 havaalanı	LTO döngüsü yıllık HC, NO _x ve CO emisyonları	Devlet Hava Meydanları İşletmesi iç hat uçuşları, EUROCONTROL ortalama rölanti süresi, ICAO emisyon indisleri	-	Ekici ve ark. (2013)
Atlanta Havaalanı	LTO emisyonları, PM _{2,5} konsantrasyonları	Model kullanarak. Haziran-Temmuz 2012 döneminde PM _{2,5} konsantrasyonlarının sağlık etkileri tespit edilmiştir.	-	Rismann ve ark. (2013)
Kore’de 4 farklı havaalanı	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, NO _x , CO, VOC ve PM	2009-2010 yıllarını kapsayan çalışmada uçaklardan kaynaklanan sera gazları ve hava kirleticilerini EDMS “Emission and Dispersion Modeling System” ile tahmin etmişlerdir.	-	Song ve Shon (2012)
Teksaş Corpus Christi Uluslararası Havaalanı	Uçak emisyonları	2005-2011 yılları arasında ticari uçakların uçuşları ele alınarak Emission and Dispersion Modelling System (EDMS) yazılımı kullanılıp emisyonlar hesaplanmıştır.	-	Thomas (2013)
Yunanistan’da 38 havaalanı sivil havacılıkta kullanılan bütün uçak türlerinin iç ve dış hat uçuşları	NO _x , VOC, CO, SO ₂ ve PM _{2,5}	EMEP/CORINAIR metodu ile 1980-2005 yılları arasında LTO emisyonları hesaplanmış		Tsilingiridis (2011)
RB211-535-E4 turbofan motoru	Karbon bileşikleri	Kromatografik yöntem	Uçağın egzoz lüle kısmına yakın bir yerden yerinde ölçümlerle, irtifa emisyon indisleri belirlenmiş.	Anderson ve ark. (2006)

Çizelge 3.1. (Devam) Literatür özeti

Test edilen motor/ Havaalanı	Ölçülen emisyonlar/ Emisyon indisleri	Yöntem/ örneklem sistemi	Test koşulları	Referans
Art yanmalı (after burner) F-15 askeri uçağı ve C-130 kargo uçağı	Tehlikeli ve reaktif 60'dan fazla organik gaz emisyonları, CO ₂ , CO, NO ve NO _x emisyon indisleri	Emisyon ölçüm sistemi	Emisyon ölçüm probu uçağın egzozundan 14.3 m uzaklığa yerleştirilerek, rölantiden maksimum güce kadar yer seviyesi ölçümleri	Spicer ve ark. (2009)
CFM56 tip motorların 9 ayrı versiyonu ile Rolls-Royce ve Pratt- Whitney üretimi diğer bazı motorlar	NO, NO ₂ , NO _x , CO, HCHO ve C ₂ H ₄ ile uçucu organik bileşikleri	Uçak üzerinde emisyon ölçümleri	Ölçüm noktası olarak motorun egzozundan itibaren 1-15 m arasında değişen noktalar seçilmiştir.	Timko ve ark. (2010)
CF6-80C turbofan	CO, HC, NO _x	Jet A yakıtı ile biodizel olarak Metil Bütanolün farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilen yakıtın CF6-80C gaz türbinli turbofan motor emisyonuna etkisi	-	Yılmaz ve İlbaş (2012)
Boeing 767 ve 744 uçakları	NO, NO ₂ , HNO ₂ , HNO ₃ ve H ₂ SO ₄	Farklı mesafeler boyunca sıcaklık değişimi ve emisyonların seyrelme profili ele alınmış ve karşılaştırılmıştır	Uçakların egzoz çıkışından 1, 30, 100 ve 1000 m uzaklıklarda emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir	Garnier ve ark. (1997)
Türbin motorları	CO, NO _x emisyonları ve emisyon indisleri	Bütanol alternatif enerji yakıtı olarak, Jet A yakıtına eklenmiş ve türbin motorlarında kullanılmış; uçak motoru çalışma performansına ve emisyonlarına etkisi incelenmiştir.	-	Mendez ve ark. (2014)

Çizelge 3.1. (Devam) Literatür özeti

Test edilen motor/ Havaalanı	Ölçülen emisyonlar/ Emisyon indisleri	Yöntem/ örneklem sistemi	Test koşulları	Referans
CFM56-2B1	İnce partikül ve organik buhar emisyonları	Gaz ve partikül bazlı emisyonlar gaz kromatografi/kütle spektroskopisi (GC-MS) ile ölçülmüştür	Motorun egzoz çıkışı 1 m uzağına yerleştirilen prob ile ölçümü yapılmış, ICAO LTO itki değerleri kullanılmış	Presto ve ark. (2011)
Los Angeles Havaalanı	UFP'lerin dağılımları ve konsantrasyonları, siyah karbon, PM _{2,5} kütlesi ve kimyasal bileşikler	Anlık yerinde ölçümler	Uçağın kalkış noktasından 610 m uzaklığa kadar 5 farklı konumda ölçümler gerçekleştirilmiştir	Zhu ve ark. (2011)

3.5. Kemilüminesans Analizöründe Girişim Etkisi

Kemilüminesans ölçüm yönteminde, kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan enerji, reaksiyonda görev alan her bir molekülün ve ara ürünler olan radikallerin enerji seviyelerinde değişime neden olur ve bu bahsi geçen molekül ve radikallerin karakterlerine uygun olarak belirli bir dalga boyunda foton yayımlarlar. Reaksiyon sonucu açığa çıkan enerjinin ortamda bulunan molekül ve ara ürünlerce emilmesi daha sonra da bu emilen enerjinin foton olarak, her bir molekül ve radikalın karakterine uygun şekilde yayımlaması sonucunda gerçekleşir (Zafiriou ve True, 1986).

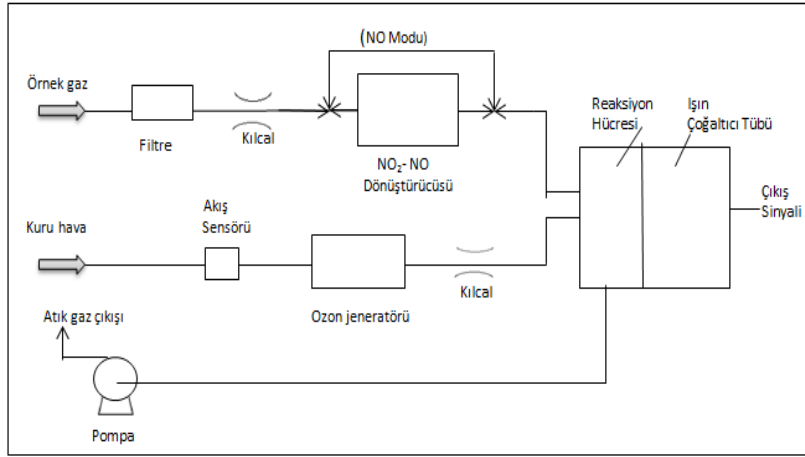
Yanma reaksiyonlarında örnekleme yapıldığında H₂O, CO₂, CO ve O₂ bileşenleri örneklem gazında mevcuttur. Bu koşullar altında, gaz karışımı kompozisyonu içindeki bileşenler üçüncü tür bir bileşen olarak reaksiyona katılır, bu durumda bu bileşenden kaynaklanan söndürme etkisi ya da girişim etkisi (*quench effect* denilen etki) gerçekleşir ve bu etki NO₂ ve NO'nun ölçümünde sapmalara neden olur. Kemilüminesans tekniğinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda üç reaksiyonda (3.1, 3.2 ve 3.3) belirtildiği gibidir (Bionda, 2004).

Gaz örneğindeki NO ozonla reaksiyona girdiğinde, elektronik olarak uyarılmış NO₂ oluşur. Oluşan NO bir üst seviyede ışık yayar (kemilüminesans). NO gazının konsantrasyonu bu kemilüminesans ışınının yoğunluğu ölçülerek tayin edilir. NO, 3.2. reaksiyonu boyunca dengeye ulaşabilir veya üçüncü bir gaz bileşeninin varlığında enerjisini bu bileşene transfer eder. 3.3. reaksiyonundaki M bu üçüncü gaz bileşenini ifade etmektedir (Zabielski ve ark. 1984; Bionda, 2004).



Kemilüminesans analizörü yakma kaynaklarından NO_x emisyonu konsantrasyonlarının ölçülmesinde kullanılan en yaygın analizördür. NO_x ölçümünde Şekil 3.1.'de çalışma prensibi verilen kemilüminesans analizörü kullanılmaktadır. Bu analizöre giren örneklem gaz filtreden geçer. Analizörün NO modunda, NO ile ozon (O₃) reaksiyon hücresinde reaksiyona girer. Reaksiyon sonucu oluşan uyarılmış NO₂'nin uyarılmamış duruma dönüştürülmesi sırasında açığa çıkan foton enerjisi (kimyasal ışın enerjisi) ölçülür. Bu enerji miktarının

ölçümü ile buna karşı gelen NO_2 miktarı belirlenir. Böylece başlangıçtaki NO miktarı belirlenmiş olur. Örnek gaz içerisinde mevcut NO_2 'nin ölçümünde ise, gazlar ısıtılarak NO_2 bir dönüştürücüde NO 'ya çevrilir. Çevrilen NO_2 analizörde $\text{NO}_x - \text{NO}$ farkından hesaplanır. NO ve NO_2 içeren egzoz gazlarında ölçümün ayrı ayrı yapılması istenildiğinde, önce NO miktarı, sonra da dönüştürücüden geçirilen gazlardaki NO_x miktarı belirlenir. Böylece her iki ölçümün farkından da NO_2 miktarı bulunur (Bionda, 2004).



Şekil 3.1. Kimyasal ışımaya yöntemi

Perma pure kurutucuda yöntem, örneklem gazındaki H_2O 'nun (nem), devamlı kurutma ile çok düşük çığ noktasında örneklem hattında yönünün değiştirilmesi ve örneklem gazından ayrılması şeklindedir. Örneklem gazındaki su molekülleri, kurutucu boyunca yer alan polimer tüplerin geçirgen duvarından geçerek örneklem hattından ayrılır.

Kemilüminesans analizörlerinde örneklem gazında NO-NO_2 bileşenleri ile birlikte bulunan gaz bileşenleri (yanma gazları vb.) analizörde üçüncü bir gaz bileşen olarak (NO ve Ozon haricinde) girişim etkisi yapmaktadırlar. Bu bileşenlerden kaynaklanan girişim etkisi, NO ve NO_2 ölçüm sonuçlarında sapmalara neden olmaktadır. Literatür araştırmalarında kemilüminesans analizörlerinde girişim etkisinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalarda, referans gaz karışımları (içinde diğer gazları içeren NO , NO_2) hazırlanarak, bu gaz karışımlarının NO-NO_2 derişimleri ölçülmüştür.

Literatürde, kemilüminesans analizörleri üreten firmaların ürettikleri analizörlerin farklı gaz bileşenler için girişim katsayısını belirleme ile ilgili

çalışmalar yer almaktadır. Analizörlerde her bir bileşen için girişim katsayısı belirleyerek, bu katsayıların ölçüm sonuçlarının doğrulanmasında düzeltme faktörü olarak kullanılması sağlanmıştır. Ek olarak analizörlerin NO-NO₂ ölçümlerinde sapmalara neden olan gazların varlığında analizörlerin ölçüm verimliliği üzerine çalışmışlardır.

Kemilüminesans analizörlerinde H₂O girişiminin engellenmesi çalışmalarında analizörden önce örneklem hattına kurutucu/su tutucu yerleştirilerek H₂O örneklem hattından uzaklaştırılmıştır. Ancak bu çalışmalar, örneklem hattında su ile birlikte NO₂'nin de tutulacağını, bu durumda analizörde ölçülen NO₂ konsantrasyonunun ıslak örneğe (su tutulmadan) göre daha düşük değerde olacağını göstermiştir.

Kemilüminesans analizörlerinin reaksiyon odası basıncına bağlı olarak, NO-NO₂ ölçümlerinin değişimi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, analizörün reaksiyon odası basıncı arttıkça NO₂'nin diğer gazlarla etkileşiminin artacağını göstermiştir. Reaksiyon odası basıncı arttıkça analizörde ölçülen ve örneklem gazında yer alan NO gerçek konsantrasyonundan daha düşük konsantrasyonlarda ölçülmesine neden olacaktır.

Matthews ve ark. (1977) tarafından yapılan çalışmada, *quenching effect*'e neden olan yanma gazlarındaki bileşenler (H₂O, CO₂, CO, H₂, O₂ ve Ar) bilinen konsantrasyonlarda, NO gazına karıştırılmış ve bu gaz karışımı NO_x kemilüminesans analizöründe ölçülmüştür. Her gaz bileşeninin analizörde NO ölçüm sonuçlarına etkisi formülize edilerek *quenching effect* sonuçları karşılaştırılmıştır. Yanma süreçlerinde yüksek konsantrasyonlarda H₂O salındığı için NO konsantrasyonu %30 daha az değerde ölçülmüştür. En fazla *quenching effect*'e, ölçülen gazlardan H₂O gazının sahip olduğu tespit edilmiştir.

Teledyne Analytical Instruments firması tarafından iki farklı kemilüminesans analizöründe *interference* etkisi testleri yapılmıştır. 90 ppm NO gazına bilinen konsantrasyonlarda SO₂, NO, NO₂, N₂O, CO, CH₄, CO₂ ve H₂O gazları karıştırılarak bu gaz karışımlarının analizörlerde girişim etkileri ve NO ölçümlerindeki değişimler karşılaştırılmıştır. Her iki analizörde de en düşük ölçümlerin CO₂ gazı varlığında olduğu tespit edilmiştir. Bu testlerle iki analizörün ölçüm verimliliği karşılaştırılabilmiştir (Teledyne, 2010)

Folsom ve Courtney (1979) tarafından yapılan bir çalışmada ise, kemilüminesans analizörünün reaksiyon odası basıncına bağlı olarak *quenching effect*'teki değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmaya göre reaksiyon odasındaki basınç arttıkça NO₂ ile birlikte örneklem gazında bulunan bileşenlerin kimyasal olarak reaksiyona girmesi *quenching effect*'i arttıracaktır. Basınç düştükçe bu etki azalacaktır. Reaksiyon odası basınçları farklı iki kemilüminesans analizörüne (analizörlerden birinin reaksiyon odası basıncı atmosfer basıncında, diğerinin atmosfer basıncının altında), bilinen konsantrasyonlarda dengede N₂ içinde NO₂ gazı ve H₂O gazı ile beslenmiştir. Bu gaz karışımı, reaksiyon odası basıncı farklı bu iki analizörde ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları karşılaştırılarak, reaksiyon odası basıncının NO ölçümlerinde standart sapması bulunmuştur. Örneklem gazının çığ noktasına düşürülmesi ve kuru ölçümler yapılması neticesinde analizörde NO ölçümlerinin değişimi ve standart sapmaları bulunmuştur.

Campbell ve ark. (1982) tarafından yapılan çalışmada ise, gaz türbin motorlarında NO_x emisyonu kemilüminesans analizöründe ölçülmüştür. Yanmadan kaynaklanan H₂O ve dış ortam neminin yarı geçirgen membran kurutucu kullanılarak analizöre su girişimini engellemek amaçlanmıştır. Çalışmada NO (N₂ ile dengede), hava içinde NO₂ ve egzoz gazı örneklem gazları test edilmiştir. Öncelikle bu örneklem gazları ıslak bazda (su içeriği ile) analizöre beslenerek, analizörde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Analizöre gelen örneklem hattı, örneklem gazı içeriğindeki su buharının yoğunlaşmasını önlemek için ısıtılmıştır. Daha sonra örneklem hattına kurutucu yerleştirilerek örneklem hattındaki su buharı tutulmuş ve kuru örnek analizöre beslenmiştir. Bu çalışmalar sonucu su buharının NO ve NO₂ ölçümlerine etkisi belirlenebilmiştir. Islak ölçüm sonuçları kuru ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak, analizör için düzeltme faktörleri geliştirilmiştir. Su buharı içeriği %1.74-12.64 arasında artırılarak yapılan deneylerde analizörde NO, 493 ppm'den 11 ppm NO değerlerine sürekli olarak inmiştir. Kurutucu kullanılması durumunda ise, kurutucudan sonra analizörde ölçülen NO konsantrasyonunun, başlangıç NO derişiminden büyük oranda saptadığı tespit edilmiştir. NO₂ gazı ile yapılan deneylerde ise kurutucunun uzunluğu attıkça NO₂ kaybının arttığı buna bağlı olarak analizörde ölçülen NO₂ konsantrasyonunun azaldığı tespit edilmiştir. Bu duruma ise,

kurutucu ile ayrılan su buharı tarafından NO₂'nin adsorblanması neden olmaktadır.

Van der Mark ve ark. (1997) tarafından yapılan bir çalışmada kemilüminesans analizöründe, H₂O ve CO₂ için 'girişim katsayıları' formüle ederek, bu gaz bileşenlerinin analizörde neden oldukları söndürme etkileri karşılaştırılmıştır. 50, 100 ve 200 ppb konsantrasyonlarda NO gazı, bilinen derişimde H₂O ile karıştırılarak analizöre beslenmiş ve analizörde NO konsantrasyonu ölçülmüştür. Aynı konsantrasyonlarda NO gazları, bilinen derişimde CO₂ ile karıştırılarak analizörde NO değeri ölçülmüştür. Örneğin, 100 ppm NO (N₂ ile dengede), %100 CO₂ ve hava gaz karıştırıcıda karıştırılarak, öncelikle su buharı ile beslenmiş, sonrasında ise bu karışıma su buharı vermeyerek analizörde ölçümler gerçekleştirilmiştir. H₂O nun kısmi basıncına bağlı olarak NO derişimindeki değışimler *relative quenching* katsayılarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Aynı analizler diğer NO konsantrasyonları için de gerçekleştirilmiştir. H₂O içeren, 200 ppb NO konsantrasyonlu örneklem gazı su tutucudan (cold trap) geçirilmiş, bu karışım (%0-10 CO₂) ile karıştırılarak analizöre beslenmiş ve analizörde NO konsantrasyonu ölçülmüştür. Bu deneyler sonucunda, kuru gazda yapılan ölçümlerde NO konsantrasyonunun, H₂O içeren ölçümlere oranla daha az (%14) olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir bulguya göre ise, suyun kısmi basıncı (örneklem gazında) ve sıcaklığı arttırıldığında NO '*relative quench*' e bağlı olarak artmıştır. CO₂ ile yapılan deneyler sonucunda her % CO₂ artışı başına NO kuru ve ıslak gaz için ölçüm yapıldığında, ıslak örneklem gazı ile yapılan ölçümlerde NO konsantrasyonu kuru gaza göre daha düşük olarak ölçülmüştür. Bu durumda, suyun kısmi basıncının etkili olduğu yorumu yapılmıştır. Örneklem gazında CO₂'nin yüzde konsantrasyonu arttıkça NO değeri (analizörde ölçülen değeri) azalmıştır.

Kemilüminesans analizörleri ile ilgili Bionda'nın (2004) yaptığı çalışmada; 4 farklı model kemilüminesans analizöründe nem ve CO₂'den kaynaklanan söndürme etkileri belirlenmiştir. Bu çalışma ile dört analizörün neme ve CO₂ gazına duyarlılığı ve bu bileşenlerinin varlığında analizörlerin NO ölçüm verimliliği değerlendirilmiştir. Bilinen konsantrasyonlarda karıştırılarak hazırlanan NO-CO₂ referans gaz karışımları analizörlere beslenmiştir. Her

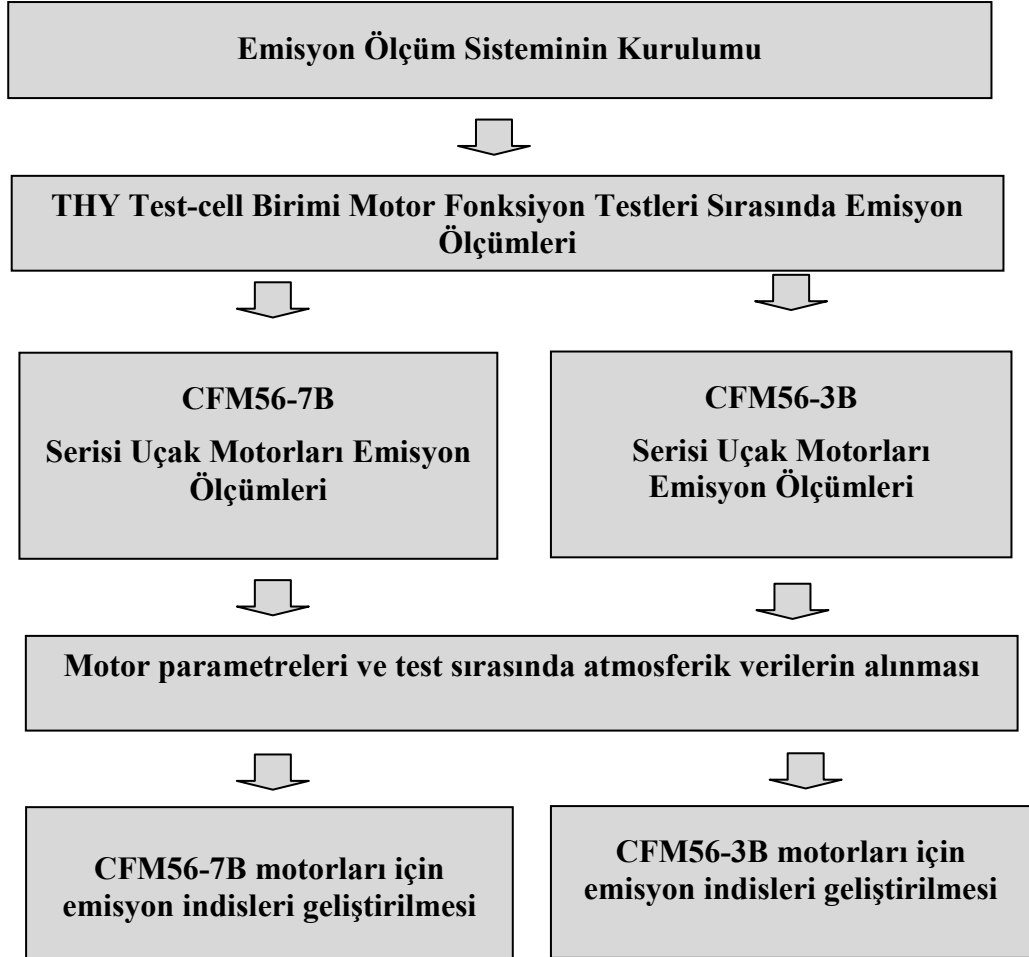
analizörde ölçüm sonuçları kaydedilmiş ve ölçülen NO konsantrasyonu ile giriş NO konsantrasyonu karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile analizörlerde CO₂'nin neden olduğu girişim etkisinin ölçüm sonuçlarına yansımaları değerlendirilmiştir. Ek olarak, analizörlerin CO₂ varlığında ölçüm verimliliği ve analizörlerde ölçüm sonuçlarında sapma oranları tespit edilmiştir.

Tidona ve ark. (1988) tarafından yapılan bir çalışmada ise kemilüminesans analizöründe, CO₂, H₂O, CO, Ar ve O₂ gazlarının interference (girişim ile ölçüme müdahalesi) katsayılarını ve 'quenching' katsayıları hesaplanmıştır. Bilinen konsantrasyonlarda bu 5 gaz ayrı ayrı olarak konsantrasyonu bilinen NO gazı ile karıştırılarak analizörde NO ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bilinen konsantrasyonda NO₂ içeren gaz örneği, oda sıcaklığı koşullarında ve atmosferik basınçta bir buharlaştırma ünitesinden geçirilmiştir. Bu örneğin NO₂ içeriği, analizörde ölçülmüştür. Ardından aynı örnek hazırlanarak buharlaştırma ünitesinden sonra su tutucudan geçirilmiş ve yine NO₂ içeriği analizörde ölçülmüştür. Suyun örneklem hattından uzaklaştırılması NO₂'nin de su ile birlikte örneklem hattından ayrılmasına neden olmuştur. Bu nedenle analizörde ölçülen NO₂ değeri azalmıştır. NO'da ise belirgin bir değişim gözlenmemiştir. NO konsantrasyonunun reaksiyon odası basıncına bağlı olarak değişimi çalışmaları sonucunda ise reaksiyon odası basıncı arttıkça NO konsantrasyonunun azaldığı tespit edilmiştir.

Zabielski ve ark.'nın (1984) yaptığı çalışmada NO_x kemilüminesans analizörü örneklem hattında kılcal akış hızına bağlı olarak *quenching effect* teorisi geliştirilmiştir. Ar, CH₄, CO₂, CO, O₂, He ve H₂ gazlarının analizörde kılcal akış hızına bağlı olarak yarattıkları *quenching effect* hesaplanmıştır. Analizörde kılcal akış hızı, hat çapı ve uzunluğu, kılcalın girişinde ve çıkışında basınç farkı, reaksiyon odasındaki kısmi basıncına bağlı ve referans ve seyreltme gazının girişim katsayısı değerleri kullanılarak bir model geliştirmiştir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmanın önemli bölümü 111Y048 proje no'lu ve "Türkiye'de Faaliyet Gösteren Havayolu Şirketlerine Ait Ticari Uçak Emisyonlarının Turbofan Test-cell Emisyon Ölçümlerine ve Gerçek Uçuş Verilerine Dayalı Analizi" isimli TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, uçak motoru emisyon ölçüm sistemi, çalışmada kullanılan motor verileri, atmosferik veriler ve kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar şematik olarak Şekil 4.1 de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Tez süresince gerçekleştirilen çalışmaların şematik gösterimi

Bu çalışmada, uçak motorlarının performans ve fonksiyonel testlerinin yapıldığı ve uçağın normal uçuş koşullarının denenerek motor veriminin ve çalışmasının test edildiği test-cell denilen birimde yapılan motor testleri sırasında emisyonlar anlık olarak ölçülmüştür. Test-cell biriminde emisyon ölçümlerinin yapılmasının apronda ve pistte yapılan ölçümlerden farkı; yüksek motor güçlerinde çalışması sırasında emisyon üretimini karakterize fırsatı sağlaması, aynı zamanda hiçbir rüzgar ve hava kirliliği kaygısı olmadan risksiz bir ölçüm gerçekleştirilmesi, nispeten uzun ve istikrarlı çalışma sürelerinde oluşan benzer çevre koşullarında daha güvenilir ve tekrarlanabilir ölçümler sağlamasıdır. Kanat ölçümleri mümkün olmadığında emisyon ölçümü gerçekleştirilebilmesi ve aynı anda çok sayıda motor verisini kaydetme özelliği sağlaması nedeniyle test-cell ölçümleri yararlı olabilmektedir (Turgut ve ark. 2014).

Emisyon ölçümleri yeni bakımdan çıkmış (overhaul) yolcu uçaklarına ait CFM56-7B ve CFM56-3B motorlarını kapsamaktadır. Bu motorlar için karbonmonoksit, karbondioksit, azot oksitler ve toplam hidrokarbon emisyonları motorun spesifik motor güçlerinde, motorun fonksiyon testleri sırasında gerçekleştirilmiştir. Az sayıda performans testinde de ölçümler gerçekleştirilmiştir. Motorun fonksiyon testleri ile ilişkili olan parametreleri; motor devri (N1), itki, anlık yakıt tüketimi ve egzoz gaz sıcaklığı (EGT) üzerinde durulmuştur. Bu parametrelerden yakıt tüketimi, motor devri ve itki halihazırda emisyon üretimi araştırmalarında kullanılan birincil motor parametreleridir. Emisyon indisi hesaplamalarında ve emisyon sonuçlarının değerlendirmesinde kullanılan parametreler:

Motor test parametreleri:

- N1; motor devri, rpm
- FF; anlık yakıt akışı, kg/sn
- T49; egzoz gazı sıcaklığı, °C
- itki, %
- P3; yanma odası giriş basıncı, kPa
- T3; yanma odası giriş sıcaklığı, °C

Motor itkisi N1 ile orantılı olarak kabul edilir. Bu sebeple emisyon değerleri, farklı N1 değerlerine göre hesaplanmıştır.

Atmosferik parametreler:

- Dış ortam havasının nemi, % bağıl nem
- Dış ortam havasının sıcaklığı, °C
- Dış ortam hava basıncı, psi

Motor parametreleri ve atmosferik veriler fonksiyon testi sırasında anlık olarak kaydedilen verilerdir. Motor testi genelde aşağıdaki adımlardan meydana gelmektedir:

- 1- Yer rölantisi
- 2- Uçuş rölantisi
- 3- Yüksek devir
- 4- Kalkış devri
- 5- Uçuş rölantisi
- 6- Yer rölantisi

Bu test adımlarının motor devri ve süreleri motor tipine ve testin fonksiyonel veya performans testi olup olmadığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, Mayıs 2013 ile Mayıs 2014 sürelerine ait bir yıllık süreçte yeni bakımdan çıkmış dört farklı motor tipi ve 14 farklı motor olmak üzere toplam 25 tam emisyon ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu süre zarfında test edilen motorlar ve yapılan testlere ait bilgiler Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Emisyon testi yapılan motor tipleri aşağıda listelenmiştir:

- M1: CFM56-3B1
- M2: CFM56-3B2
- M3: CFM56-7B24
- M4: CFM56:7B26

Motor testi sabit devirlerde motor tipine göre değişmekle birlikte temel olarak iki farklı düşük devir çalışması ile belirli sayıda yüksek devir çalışmasından oluşur. Testi yapılan her dört tip motorun düşük devir aşamaları sırasıyla minimum rölanti ve yaklaşma (approach) rölantisi olarak tanımlanır. Yüksek devir aşamaları ise motordan motora ve testten teste farklı devirlerde gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte bazı testlerde yüksek devirlere çıkılmayıp yalnızca minimum ve yaklaşma rölantisinde düşük devirlerde motor çalıştırması söz konusu olmuştur. Ayrıca rölanti koşulları, testin başında veya sonunda

olmasına göre de ayrılmıştır. Buna göre testin başındaki minimum ve yaklaşma rölantileri sırasıyla MinC ve AppC, sonundakiler ise sırasıyla MinH ve AppH olarak tanımlanır (C motorun soğuk (cold) çalışma koşulunu, H motorun sıcak (hot) çalışma koşulunu ifade etmektedir).

Çizelge 4.1. Ölçüm yapılan CFM56 tipi motorlar ve ölçüm esnasındaki atmosfer koşulları

Test no	Motor Tipi	Test tarihi	Test başlangıcı	Test sonu	Test süresi	Dış sıcaklık (°C)	Dış basınç (kPa)	Nem
Test01	M2	22.05.13	15:22:02	16:28:43	01:06:41	28.4	100.42	33.2
Test02	M2	22.05.13	19:00:07	20:01:06	01:00:59	25.8	99.97	43.4
Test03	M2	22.05.13	20:58:34	22:40:30	01:41:56	24.4	100.35	49.0
Test04	M2	22.05.13	23:23:18	00:08:31	00:45:13	23.4	100.30	58.4
Test05	M4	24.05.13	10:24:41	11:23:45	00:59:04	22.7	99.97	56.3
Test06	M4	24.05.13	15:17:25	15:46:06	00:28:41	23.9	99.98	42.2
Test07	M1	22.06.13	16:25:16	17:33:20	01:08:04	26.0	100.81	42.4
Test08	M1	22.06.13	19:56:41	21:30:45	01:34:04	23.9	100.66	50.4
Test09	M4	23.07.13	01:33:31	02:34:00	01:00:29	20.9	100.73	63.4
Test10	M4	30.08.13	01:41:56	02:59:21	01:17:25	23.8	100.71	85.7
Test11	M4	29.11.13	05:05:21	05:43:01	00:37:40	5.2	101.53	73.6
Test12	M4	29.11.13	15:34:48	16:04:50	00:30:02	9.3	101.43	47.6
Test13	M4	29.11.13	16:28:49	17:15:40	00:46:51	9.0	101.46	47.5
Test14	M3	27.12.13	10:50:01	11:53:00	01:02:59	12.3	101.27	48.8
Test15	M4	13.01.14	20:56:01	21:50:00	00:53:59	-	-	-
Test16	M4	24.01.14	11:03:06	11:50:05	00:46:59	12.2	101.31	79.5
Test17	M4	24.03.14	23:10:46	00:18:39	01:17:53	15.0	100.30	54.5
Test18	M4	10.04.14	07:24:01	07:47:00	00:22:59	12.2	100.59	73.8
Test19	M4	10.04.14	09:50:01	10:48:09	00:58:08	14.8	100.59	59.5
Test20	M4	04.05.14	00:35:01	01:09:42	00:34:41	18.6	100.31	56.6
Test21	M4	04.05.14	02:20:01	03:15:00	00:54:59	18.5	100.07	54.2
Test22	M4	17.05.14	09:27:11	10:02:26	00:35:15	18.2	100.97	60.2
Test23	M4	17.05.14	16:06:53	16:44:52	00:37:59	22.3	100.98	29.6
Test24	M4	17.05.14	17:01:11	18:10:30	01:09:19	22.0	100.98	27.5
Test25	M4	26.05.14	11:57:11	12:48:08	00:50:57	22.7	100.98	69.6

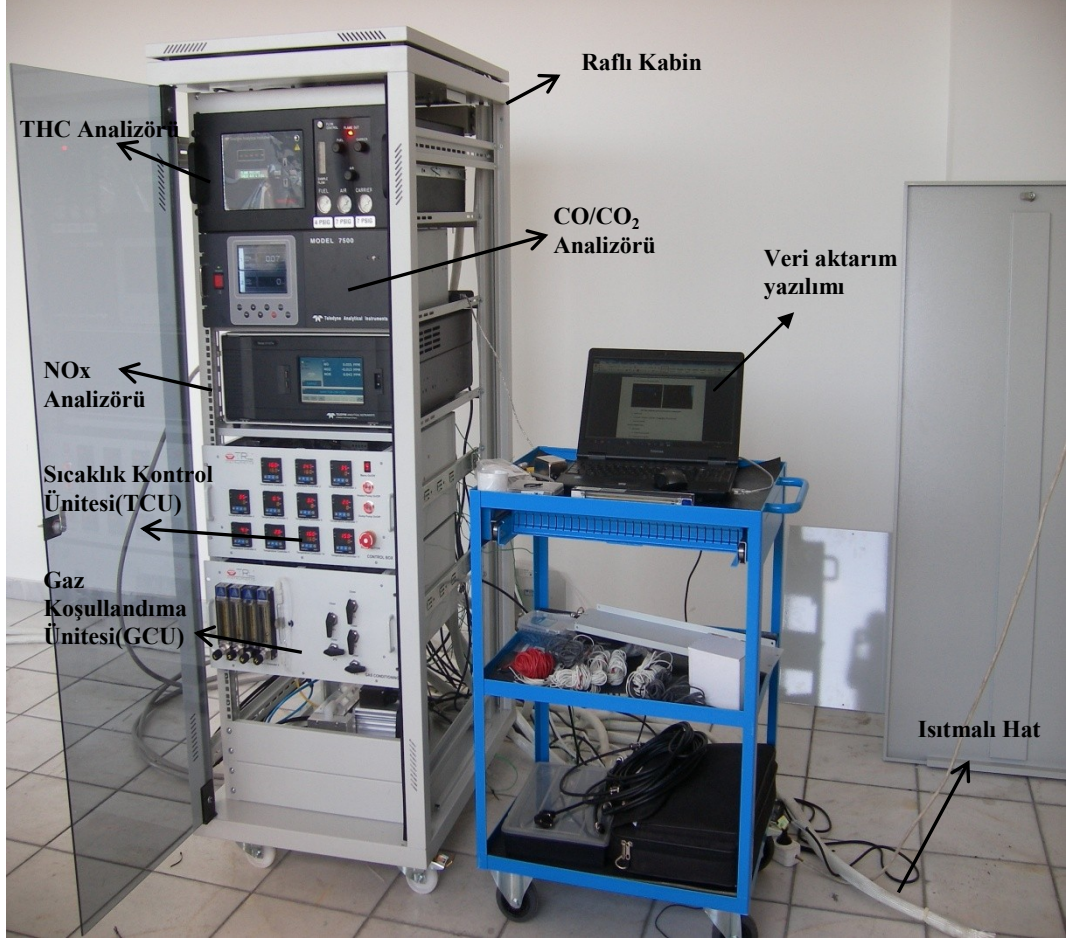
Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere en uzun ve en kısa test süresi sırasıyla 01sa41dak ve 0sa23dak olarak gözlenmiş olup tüm testlerin toplam süresi 23 saat olarak gerçekleşmiştir. Emisyon ölçümlerinin bir motorda arka arkaya tekrarlanması, bulunan sonuçların kararlı olarak elde edilip edilmediğinin gözlenmesi anlamında önemlidir.

15 Ocak 2014 (Test15) tarihli teste ait motor verileri teknik arıza nedeni ile temin edilemediğinden, bu motora ait testin sadece emisyon ölçüm verileri mevcuttur.

4.1. Emisyon Ölçüm Sistemi

Uçak motorundan salınan; NO_x, HC, CO ve CO₂ emisyonları analizi için tasarlanan örneklem sistemi; prob, örneklem hattı, elektrik ve diğer bağlantı kabloları, pompalar, analizörler, gaz şartlandırma ünitesi, sıcaklık kontrol ünitesi, veri aktarım yazılımı, kalibrasyon gazları tüplerinden oluşmaktadır.

Uçak motoru egzoz lülesinden örnekleme probu ile toplanan gazlar örneklem sistemine ısıtmalı hat boyunca iletilir. Sistemde *dump* (boşaltma) ve *heated* (ısıtmalı) olmak üzere iki adet pompa ile probdan egzoz gazı çekilir. Motordan çıkan gaz dump pompası yardımıyla örneklenir. Örneklenen gaz sıcak bağlantı noktasında ikiye ayrılır. Örneğin bir kısmı dump pump ile dış ortama atılırken diğer kısmı ise gaz koşullandırma birimine gelir. Örnek, gaz koşullandırma birimi çıkışlarından toplam hidrokarbon analizörü, azot oksit analizörü ve karbonmonoksit- karbondioksit analizörü olmak üzere üç analizöre uygun debi, sıcaklık ve basınç koşullarında dağılır. Analizör çıkışları ise havalandırma çıkışına bağlıdır. 160±15°C ısıtmalı hatla toplam hidrokarbon analizörüne gelen gazlar, 65±15°C ısıtmalı hat ile azot oksit analizörüne gelen gazlar tayin edilir. Karbonmonoksit ve karbondioksit gazlarının analizi dump pompasından gelen gaz ile yapılır. Rafli düzenekte bulunan panel üzerinde yer alan gaz şartlandırıcıdan gaz akış debileri, sıcaklık kontrolöründen ise hat sıcaklıkları gibi değişkenleri kontrol etmek mümkündür. Sistemin genelinde gaz akışını kontrol eden ve gaz akışlarına yön veren *valfler* bulunmaktadır. Sistemin akış şeması Şekil 4.2'de verilmektedir. Bütün bu ekipmanların işlevleri detaylı açıklanmıştır.

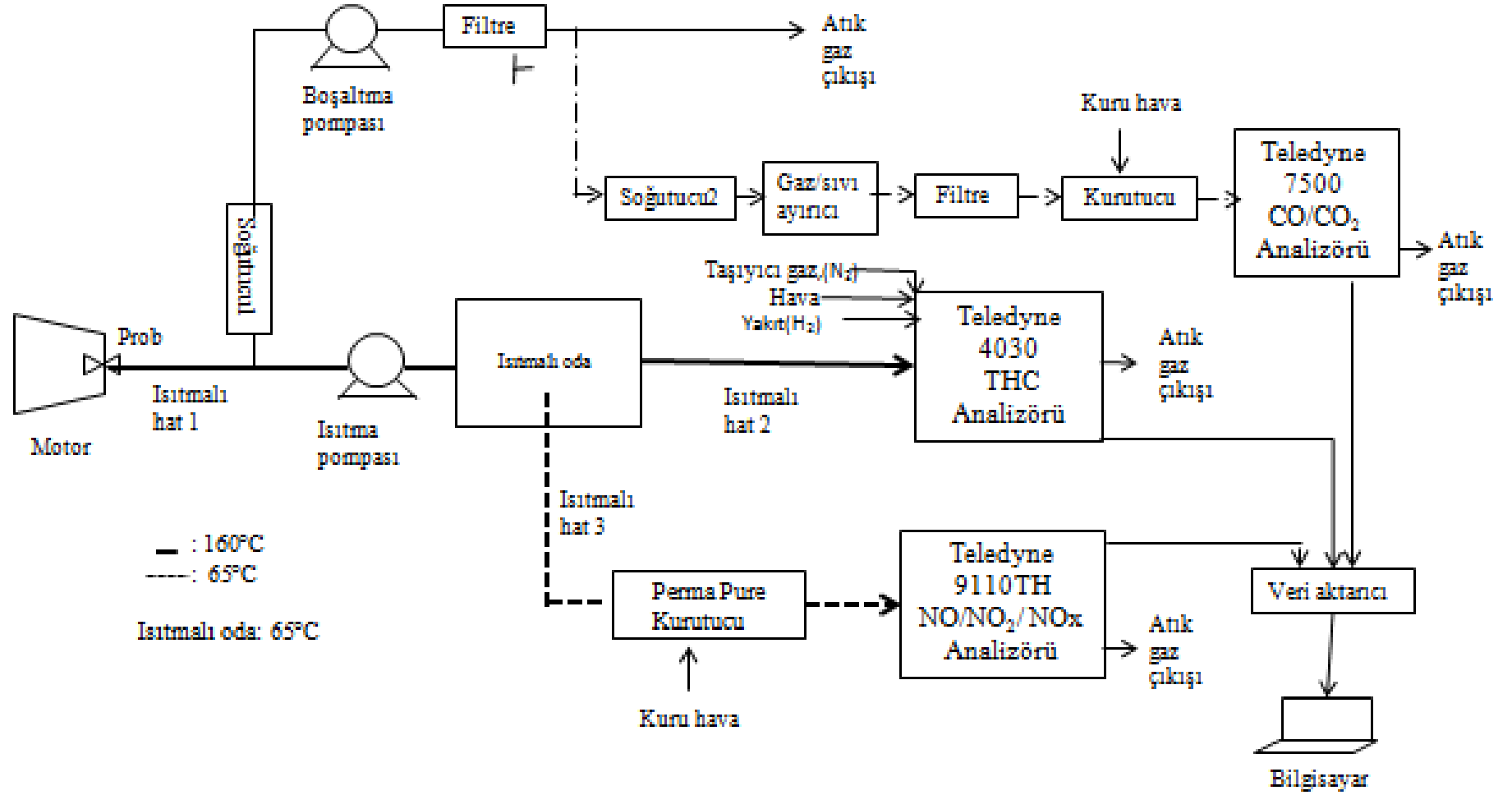


Şekil 4.2. Emisyon ölçüm sistemi

Örneklem sisteminde Şekil 4.2'dekilerle birlikte yardımcı ekipmanlar yer almaktadır. Söz konusu ekipmanlar sistemin kendi içerisinde ve analizörlerin içlerinde yer alan; elektrik ve diğer bağlantı kabloları, filtreler, kurutucu, akış yönünü sağlayan vanfler, peristaltik pompa, akış ayarı yapan rotametre gibi ekipmanlardır.

Uçak motoru emisyon örnekleme ve ölçüm sisteminde gaz örnekleme sistemi, büyük ölçüde ICAO Annex 16'da turbofan motorların emisyon ölçümleri için tavsiyeler kısmında verilen yöntemle göre hazırlanmıştır. Örneklem sisteminin ICAO yönteminden farklı yönlerinden biri örnekleme noktasının yeridir. ICAO Annex 16'da örnekleme noktasının motor egzozundan maksimum uzaklık olarak egzoz çapının yarısı kadar uzaklığa yerleştirilmesi tavsiye edilmiştir. Ancak bu çalışmada ölçüm probu motorun alçak basınç türbinin hemen ortasına yerleştirilmiştir. Bir diğer fark ölçüm noktasının sayısıdır, bu çalışmada tek bir

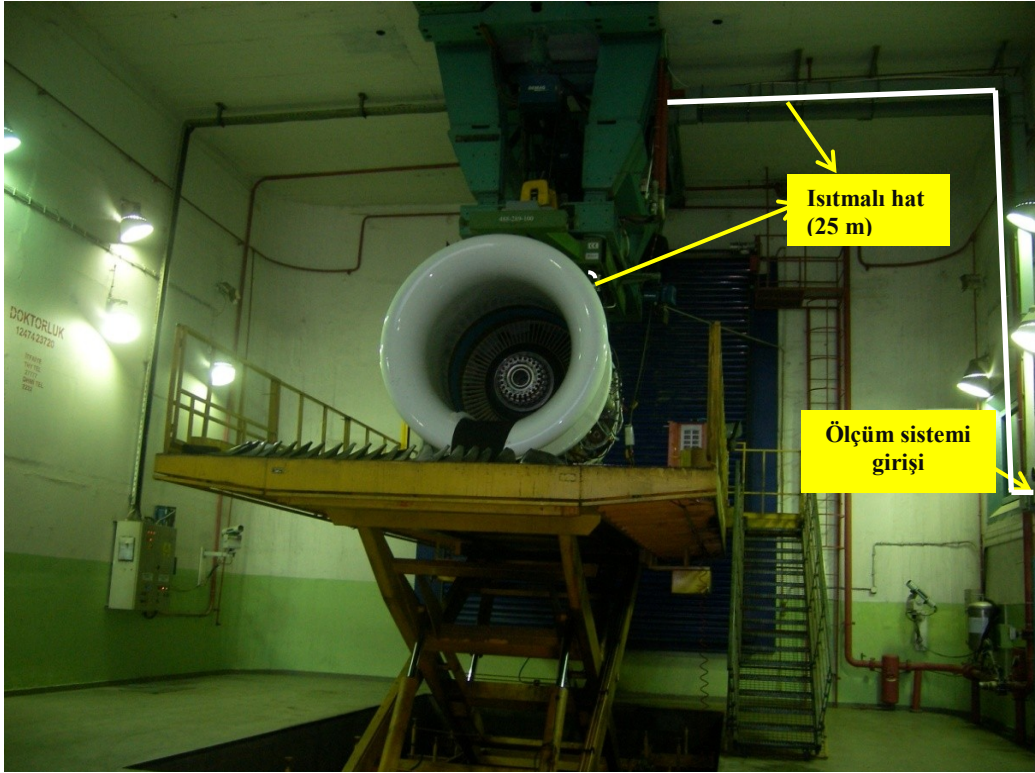
noktadan örneklem alınırken, ICAO'da egzoz içeriğinin tam olarak temsil edilmesi için örneklemenin en az on iki farklı noktadan yapılması önerilmektedir. Ancak çalışmada kullanılan prob motorun içinde yer aldığından dış ortam havası ya da bypass havası ile temasının olmaması bir avantaj sayılabilir. Ancak egzoz gazının motor içinde homojen olmaması durumunda tek noktadan örnek almaktan kaynaklı hatalar oluşabilir.



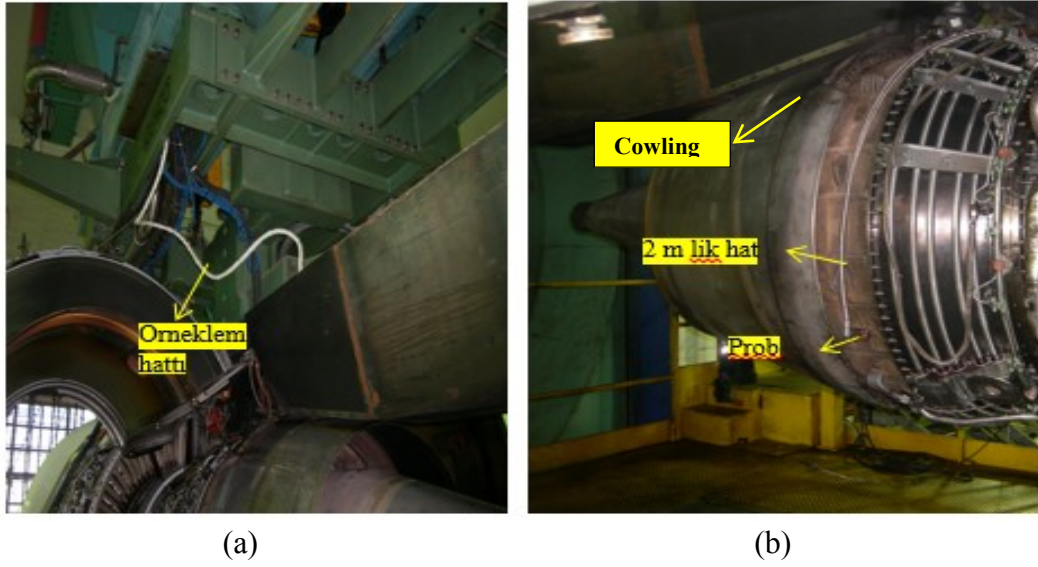
Şekil 4.3. Uçak motoru emisyon örneklem sistemi akış şeması

Kalibrasyon gazı alanı tüplerden ve dağıtım kutusundan oluşur. Bu tüplerin bir kısmı doğrudan dağıtım kutusuna bağlıdır ve buradan analizörlere verilecek kanallara sahiptir. Kalibrasyonu yapılmak istenen gazın türüne göre buradaki tüplerin girişleri dağıtım kutusuna bağlı olanlarla değiştirilir.

Örnekleme Hattı: Örnekleme probundan analizörlere egzoz gazı paslanmaz çelik hat ile taşınmaktadır (Şekil 4.4). Hattın, analizörlere kadar olan kısmı elektrikli ısıtmalı ve sıcaklık kontrollüdür. Uzunluğu 25 m, iç çapı 1/8 mm'dir. Probdan, *cowling*'e (motorun üstünde, motoru çevreleyen test sırasında kapatılan kaporta) 2 m'lik esnek, 1200°C'ye kadar dayanıklı paslanmaz çelik hat ile (Şekil 4.5.b), hattın *cowling* bağlantısından sonraki ısıtmalı hatta bağlantı noktasına kadar yalıtım malzemesi ile kaplıdır (Şekil 4.5.a) ve ısıtmalı hat bağlantısına eklenmiştir. Isıtmalı hatta bağlantı noktası yalıtım malzemesi ile kaplanmıştır.



Şekil 4.4. Test-celldede (bremze) turbofan motoru



Şekil 4.5. Örneklem hattı: uçak motorundan ısıtılmalı hat bağlantısına kadar (a) yalıtım malzemesi kaplı, ısıtılmalı hatta bağlanan hat (b) probdan 2 m'lik hat ile örneklem hattına bağlanan hat

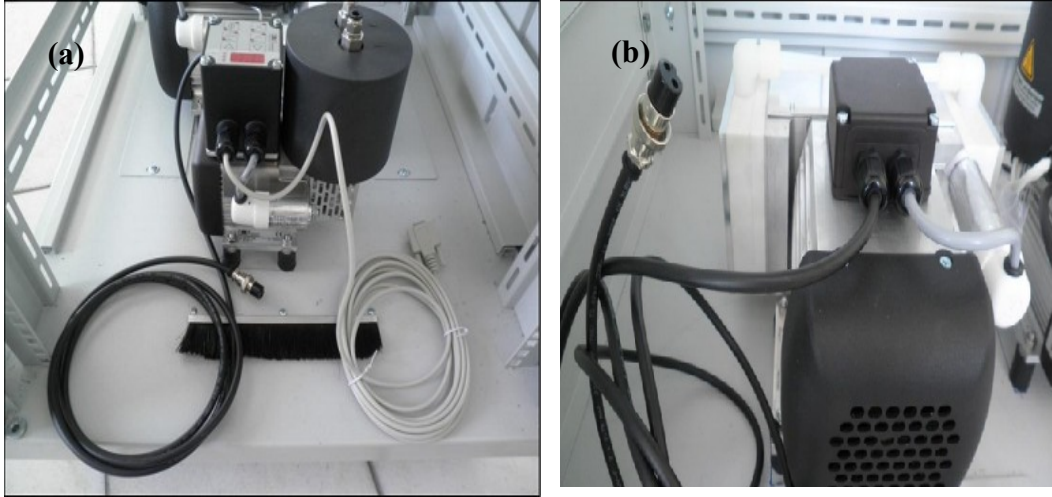
Örneklem hattında yoğuşmadan kaynaklanan kayıpları önlemek ve temasta olan yüzeylerde birikmeyi önlemek için örneklem hattı $160\pm 15^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarına kadar ısıtılmaktadır. Isıtılmalı hattın THC analizörüne bağlandığı hattın sıcaklığı $160\pm 15^{\circ}\text{C}$, NO_x analizörüne bağlandığı hattın sıcaklığı $65\pm 15^{\circ}\text{C}$ 'dir. Gazın sıcaklığının değişmesini önleyen *Hot Joint* noktaları ısıtılmalı pompadan önce, THC ve NO_x analizörlerinden önce ve diğer gerekli yerlerde sistemde yer almaktadır (Şekil 4.3). Bütün analizörlere ulaşan bağlantı hatları eşit çapta, paslanmaz çelik malzemeden yapılmıştır.

Sistemde tek yönde akışı sağlayan *çek valfler* ve gazın iki kola ayrılarak geçişini sağlayan *T bağlantı* elemanları yer almaktadır.

Analizör kabini: 1655 mm yükseklik, 600 mm genişlik ve 800 mm derinlikte olan raflı kabin analizörlerden, sıcaklık kontrol panelinden, gaz şartlandırma ünitesinden, ısıtılmalı odadan oluşmaktadır.

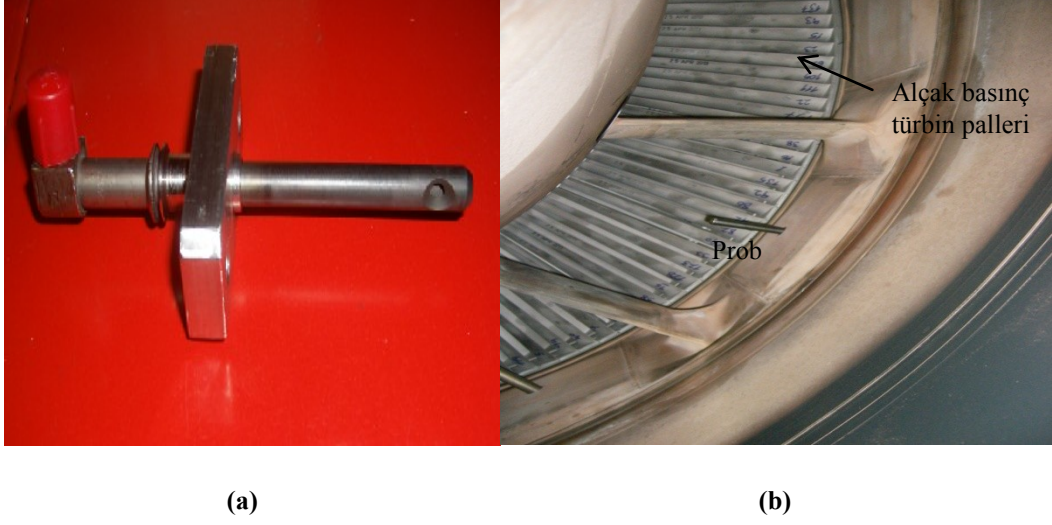
Isıtılmalı pompa (Heated pump): Isıtılmalı hattan sıcak bağlantı noktasına gelen örneklem gazının sıcaklığının ($160\pm 15^{\circ}\text{C}$) değişmesini önleyerek sıcak bağlantı noktasına (*Hot Joint 2*), buradan da şartlandırma ünitesine geçmesini sağlar. Isıtılmalı pompanın gaz akış kapasitesi 10,5 L/dk'dır.

Dump pompası (*Dump pump*): Motordan çıkan gaz *dump* pompası yardımı ile örneklenir. *Dump* pompası ile fazla hava atmosfere atılır. Bu pompa ile analizörlere aşırı örneklem gazı gitmesi önlenir ve gazın yeterli miktarı analizörlere gönderilir. *Dump* pompasından önce sistemde yer alan ısı değiştirici (*Cooler 1*) sıcak bağlantı noktasından (*Hot joint 1*) çıkan gazları soğutmak için kullanılır. Burada sıcaklığı düşen gazlar, gaz sıvı ayırıcı bölmesine gelir. Gaz şartlandırma ünitesinin ön panelinde yer alan haznede biriken kurutucudan sonra ayrılan su testten sonra boşaltılır. *Dump* pompasının diğer işlevi, örnek için sıcaklık ayarı gerektirmeyen infrared analizörüne (CO-CO₂ analizörü), akış ayarı yapılarak örnek iletmektir. Bu sayede örneğin infrared analizörüne daha kısa sürede ulaşması sağlanır. Pompanın akış kapasitesi 33 L/dk'dır.



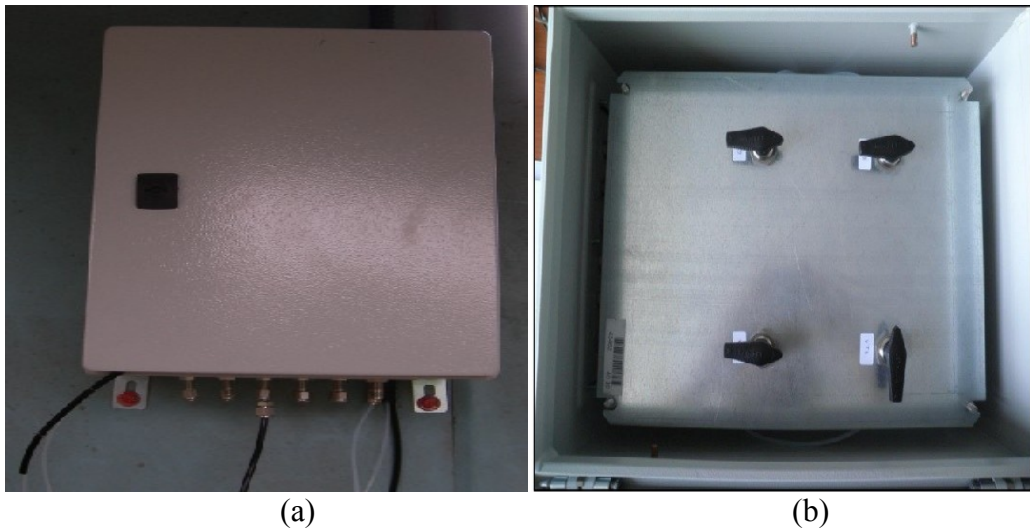
Şekil 4.6. Pompalar ve bağlantı kabloları (a) Isıtmalı pompa (*Heated pump*) (b) Boşaltma pompası (*Dump pump*)

Örneklem probu: Paslanmaz çelikten yapılmış, yüksek sıcaklığa dayanıklı prob (Şekil 4.7.a) uçak motorundan çıkan gazların sisteme alındığı birimdir. Probu iç çapı 3.175 mm, uzunluğu 10 cm dir ve prob tek girişlidir. Uçak motorunun egzoz lülesi içerisinde örnek alabilme imkanı sağlanarak motor türbin çıkışı *P49* basınç probu girişine sabitlenmiştir (Şekil 4.7.b) Prob, Isıtmalı hatta *cowling* üzerinden 2 metrelik paslanmaz çelik hat ile bağlanmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.7. (a) Örneklem probu (b) probun motordaki konumu

Dağıtım kutusu ve kalibrasyon gazı tüpleri: Kalibrasyon ve doğrulama tüplerinden gelen gazların ayrımının ve dağıtımının yapıldığı birimdir (Şekil 4.8.a). İçerisinde akış yönlerini ayarlamak için *valfler* yer almaktadır (Şekil 4.8.b). Kalibrasyon sırasında *valflerin* gerekli olanları açılır. Dağıtım kutusu kalibrasyon tüpleri alanına, duvara monte edilmiş ve tüplerle bağlantıları yapılmıştır. Kalibrasyon gazları analizörlerin ölçüm aralıkları içerisinde istenen konsantrasyonlardadır. Kalibrasyon gaz tüpleri ve HC analizörü için gerekli H₂, N₂ ve kuru hava tüpleri 50 ve 10'ar litrelik tüpler halinde ve dağıtım kutusuna boru ile bağlantısı yapılmış bir şekilde kalibrasyon gazları alanında bulunmaktadır.



Şekil 4.8. (a) Dağıtım kutusu ve kalibrasyon tüpleri bağlantı girişleri (b) Dağıtım kutusu içi ve akış valfleri

Gaz Şartlandırma Ünitesi: Isıtmalı hat 1'den gelen örneklem gazı ısıtmalı pompadan (*heated pump*) sonra gaz şartlandırma ünitesine girer. Egzoz gazı örneğinin örnekleme noktasından analizörlere ulaşmasına kadar geçen süre ICAO'nun emisyon ölçümü ile ilgili Annex 16 belgesinde 10 saniyeyi geçmemesini önermektedir, bu ölçüm sisteminde bu süre 6-8 saniyedir. Gaz şartlandırma ünitesi ön panelinde sistemde gazın akış yönünü ayarlayan 5 adet *valf* yer almaktadır. Analiz ve cihazların kalibrasyonu sırasında, bu valflerin gerekli olanları açılarak gaz akışının istenen yönde geçmesi sağlanır. Diğer valfler kapalı tutulur. Gaz şartlandırma ünitesinde gaz akışını, debisini, basıncını kontrol etmek ve gaz akışını ayarlamak için 4 adet *rotametre* yer almaktadır. *Rotametre 1*; kurutucuda kurutulan gazın infrared analizörüne ulaşmasından önce akış ayarını yapar. *Rotametre 2*; *Dump pump*'tan sonra infrared analizörüne verilmeyen fazla havanın dışarı verilmesini sağlamak için akış ayarını yapar. *Rotametre 3*; Sıfır havası kuru hava tüpünden gelen gazın akış ayarını yapar. *Rotametre 4*; *Dump pump*'tan sonra infrared analizöründen önce gazın akış seviyesini izlemek ve ayarlamak için kullanılır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Gaz şartlandırma ünitesi

Sıcaklık Kontrol Ünitesi: Ön panelinde ısıtmalı ve diğer hatlar, sıcak bağlantı noktaları (*hot joint*) ve ısıtmalı odanın sıcaklıklarının kontrol edildiği 11 adet gösterge yer almaktadır (Şekil 4.10). Sıcaklık değerleri limit sıcaklığa sabitlenmiş ve bu sıcaklığın üstüne çıkmamaları sağlanmıştır. *Isıtmalı* ve *dump* pompasının açma-kapama düğmesi ön panelde yer almaktadır. Ön panelde yer alan düğme açılınca sistem elektrikle ısınmaya başlar.



Şekil 4.10. Sıcaklık kontrol ünitesi

Veri Aktarım Sistemi: Veri aktarım cihazı (analog/dijital dönüştürücü), ara kablosu, bağlantı kabloları, bilgisayar ve yazılımdan oluşmaktadır. Veri aktarım cihazı (*Datalogger*) cihazı ile analizörlerden alınan sinyaller yazılıma aktarılmaktadır. NO_x ve CO/CO₂ analizörleri analog çıkışları ile THC analizörü RS232 portu çıkışından veri aktarım cihazı ile bağlanmıştır. Datalogger cihazı çıkışı ise bilgisayar USB portuna bağlanarak veriler eş zamanlı olarak bilgisayara aktarılmaktadır. 4-20 mA'lık ya da 0-1 V'lik sinyallerle veriler yazılıma aktarılmaktadır. Yazılım, verileri saniyelik olarak kaydetmektedir. Yazılım arayüzünde (THC, CO, CO₂, NO_x, NO, NO₂) olmak üzere 6 adet veri türü tablo ve grafik halinde 1'er saniyelik aralıklarla izlenebilmektedir. Veriler farklı dosya türleri ile kayıt altına alınabilmektedir. Analizörlerden aktarılan verilerin en yüksek ve en düşük ölçüm aralıkları değiştirilebilmektedir.

4.2. Gaz Analizörleri

NO_x, NO, NO₂ konsantrasyonları, kimyasal ışımaya (kemilüminesans) yöntemine göre ölçüm yapan Teledyne 9110TH marka analizör ile ölçülmektedir (Şekil 4.11). Reaksiyon odası ve foton çoğaltıcı tüp (PMT: photomultiplier tube), NO ve ozon arasındaki reaksiyon tarafından üretilen ışımaya ölçer. Analizörde gaz içeriğindeki NO_x, NO, NO₂ konsantrasyonları ayrı ayrı gösterilmektedir.

Analizör gaz akışını otomatik olarak ayarlamaktadır, dolayısı ile örneklem sırasında akışı ayarlamak için müdahaleye gerek kalmamaktadır. Analizörde gaz akışı 290-320 cm³/dk'dır. Isıtılmalı hattın kontrol kutusuna 160±15°C sıcaklığında gelen gaz NO_x analizörüne sıcaklığı 65°C'ye düşürülmüş olarak ulaşmaktadır. Analizöre gelen ısıtılmalı hattın sıcaklığı sıcaklık kontrol ünitesindeki göstergeden takip edilmektedir. Analizörün örneklem girişi önünde sıcaklığı 65°C'de tutan sıcak bağlantı noktası yer almaktadır. Analizörde ölçümden sonra atık gaz, analizör vent çıkışı ile atmosfere atılmaktadır. Islak ve kuru olarak ölçüm yapılabilmektedir. Gaz şartlandırma ünitesi içerisine yerleştirilen *perma pure* kurutucudan geçen örnek gaz analizöre gelmeden önce içerisindeki su buharı ayrılır. ICAO Annex 16'da belirtilen yöntemden farklı olarak NO_x ölçümleri kuru bazda yapılmıştır. Örneklem sisteminde NO_x analizöründen önce yer alan *perma pure* tipi kurutucu ile örneklem gazında (egzoz) suyun adsorpsiyonu sağlanarak, NO_x ölçümünde sapmaya neden olan “*quenching effect*” i (söndürme etkisi) elimine etmek için kuru bazda ölçüm yapılmıştır. *Quenching effect*; ölçüm hücrelerinde uyarılmış NO₂'nin fazla enerjisinin su buharı tarafından tutulmasıdır. Bu durumda su varlığında NO + O₃ tepkimesiyle gerçekleşen kemilüminesans (kimyasal ışım) NO'nun olduğundan daha az ölçülmesine neden olmaktadır. Islak bazda ölçümlerle ilgili ve NO_x analizöründe sudan kaynaklı quenching effectle ilgili deneysel çalışmalar 1209F148 nolu Anadolu Üniversitesi Yüksek Lisans projesinin bir sonucu olarak ilerki bölümlerde açıklanmış ve sonuçlar irdelenmiştir. *Perma pure* kullanılmadığında ise analizörde ıslak olarak (nemi alınmamış) ölçüm yapılabilmektedir. Sistemde yer alan *perma pure* kullanımında, su girişiminin analizörde ölçümlere etkisi tespit edilmiştir. Bu durumda ıslak ve kuru bazda yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. 500 ppm NO (balans N₂)

kalibrasyon gazı ile analizörün span kalibrasyonu, sıfır azot (N₂) gazı ile sıfır kalibrasyonu yapılmıştır. Analizörün teknik özellikleri Çizelge 4.2.'de özetlenmektedir.



Şekil 4.11. Teledyne 9110TH NO/NO₂/NO_x analizörü

Toplam hidrokarbonların ölçümünde Teledyne 4030 model alev iyonizasyon dedektör (FID) tekniğine göre ölçüm yapan analizör kullanılmaktadır. Dedektörde, hava numunesi ve yakıt (hidrojen), kontrollü akış hızlarında, yanma hücreğine gönderilir. Burada, hidrojen alevi içerisinde, hidrokarbon iyonize edilerek oluşan mevcut iyonlar ölçülür. Prensip olarak, FID yöntemi, hidrokarbonlar içindeki karbon atomlarının sayısı ile orantılı olarak cevap oluşturur (ICAO, 2008).

Isıtmalı hat 1'den 160°C sıcaklığında gelen gaz, yine aynı sıcaklıkta *ısıtmalı odaya* girmeden 5 m'lik paslanmaz çelik borudan *ısıtmalı hat 2* ile analizöre ulaşmaktadır. Analizörün örneklem gazı girişinde (*sample in*) sıcaklığı 160°C'de sabit tutan sıcak bağlantı ekipmanı (*Hot joint 3*) bulunmaktadır. Örneklenen gaz analizörün tahliye (*vent*) çıkışı ile dış ortama atılmaktadır. Analizörden önce sıcaklığı düşürmek için soğutucu, kurutucu ekipman yer almamaktadır. Analizörün ön panelinde yer alan *sample flow* göstergesi ile örneklem gaz akışı ayarlanmaktadır. Test sırasında 0.2-04 L/dk akış olması yeterlidir. Ancak özellikle düşük itkilerde ve testin başında hidrokarbon ve azot oksit analizörüne yeterli akış sağlanamadığı durumda elle akışa müdahale edilmiştir. Analizör örneklem gaz girişinden önce yer alan sıcak bağlantı noktasının (*Hot joint 3*) ve *ısıtmalı hat 2* nin sıcaklık kontrolü sıcaklık kontrol

ünitesinden yapılmaktadır. Analizörün 2 ölçüm süresi arasında 3 dakika fark vardır. İlk 1 dakika örneği hücreye aktarmak için, son 2 dakika ise hücrede analiz etmek için geçer. Analizörde proses gazı kuru hava, kuru hava tüpünden sağlanmaktadır. Taşıyıcı gaz olarak, azot gazı (N₂), yakma gazı olarak %100 saflıkta hidrojen (H₂) gazı kullanılmaktadır. Bu gazların gaz analizi sırasında basınçları analizörün ön panelinde yer alan air, carrier, fuel göstergelerinden ayarlanmaktadır (Şekil 4.12.).



Şekil 4.12. Teledyne 4030 THC analizörü

Analizörün veri aktarımı RS232 portu girişinden datalogger cihazına bağlanarak bilgisayara aktarılmaktadır. Ölçüm sonuçları analizörün ön yüzündeki ekrandan takip edilmektedir. Analizör atık gaz içeriğindeki toplam hidrokarbonu metan eşdeğeri olarak (ppmC) ölçmektedir. Analizörün teknik özellikleri Çizelge 4.2'de özetlenmektedir. Analizörün sıfır kalibrasyonu azot tüpünden, span kalibrasyonu ise metan gazı ile yapılmaktadır.

Teledyne 7500 marka karbonmonoksit ve karbondioksit analizörü (Şekil 4.13) non-dispersive infrared absorbtion- NDIR (dağılmayan infrared absorpsiyon) yöntemine göre ölçüm yapmaktadır. NDIR yönteminde ışın kaynağından yayılan ışınlar referans ve ölçüm hücresi içine yayılır. Referans hücre, infrared ışını absorblamayan azot gazı veya diğer benzeri bir gazla doldurulur. Dedektör, gaz ile doldurulur ve seçici olarak ilgili dalga boyu bandındaki infrared ışınları absorblar. Referans hücreden ve ölçüm hücresinden geçen infrared ışınlar arasındaki enerji farkı ölçülerek CO/CO₂ konsantrasyonu hesaplanır (ICAO, 2008). *Dump* pompasının çektiği örneklem gazının bir miktarı analizöre gönderilerek, analizörde ölçüm yapılır. *Dump* pompasından önce yer

alan *cooler-1* (soğutucu 1) 160°C sıcaklıktaki gazın sıcaklığını düşürür. Pompadan sonra yer alan filtrede atık gaz içindeki partikül maddeler örneklem gazından ayrılır. Analizöre gelen örneklem gazının akış hızı gaz şartlandırıcının ön panelinde yer alan rotametrelerden ayarlanır. Analiz sırasında, örneklem gazının içeriğindeki suyu (nemi) örneklem hattından ayırmak için sırasıyla *cooler-2*, peristaltik pompa, gaz-sıvı ayırıcı ve filtre yer alır. *Cooler-2*'de sıcaklığı düşürülerek yoğunlaşan örneklem gazının suyu gaz-sıvı ayırıcıda ayrılır. Suyu ayrılan gaz filtreden geçerek, numunede hala bulunan su buharı kurutucuda (*perma pure drier*) ters yönde akan kuru hava içine transfer olarak örnekten ayrılır. Kuru hava gazının akış hızı sabit ve maksimum seviyededir. Kurutucudan geçen kuru gaz analizöre gönderilir. Atık gaz, analizörün vent çıkışı ile dış ortama atılır. Analizör CO konsantrasyonunu ppm olarak, CO₂ konsantrasyonunu % hacim olarak ölçer. Analizörün teknik özellikleri Çizelge 4.2.'de özetlenmektedir. Ölçüm sonucu veriler analizörün analog çıkışından *veri aktarım cihazı* cihazına bağlanarak bilgisayara aktarılır. Analizörün sıfır kalibrasyonu N₂ ile, span kalibrasyonu ise CO ve CO₂ gazları ile yapılmaktadır.



Şekil 4.13. Teledyne 7500 NDIR CO/CO₂ analizörü

Çizelge 4.2.'de hidrokarbon analizöründe iki ölçüm süresi arası 180 dakikadır. Analizörde bir dakika hücreyi doldurma süresi sonraki iki dakika ölçümde geçen süredir. ICAO Annex 16 belgesinde (ICAO, 2008) genellikle analizörün ölçüm aralığının üst sınırının %80'ine denk gelen bir derişim kullanılması önerilmektedir.

Çizelge 4.2. Emisyon ölçüm analizörlerinin teknik özellikleri

Analizör	Ölçülen parametreler	Ölçüm aralığı	Cevap süresi	Kalibrasyon
Teledyne 9110TH (Kimyasal ışım- Standart yöntem EPA -RFNA-1104-099)	NO	0-500 ppm	1 sn	500 ppm NO (balans N ₂)
	NO _x	0-500 ppm		
	NO ₂	0-100 ppm		
Teledyne 4030 (Alev İyonizasyon dedektör-EPA 40CFR 60 Metod)	THC	0-5000 ppmC	180 sn	4000 ppm metan (balans hava)
Teledyne 7500 (NDIR-EPA TTN EMC Method 10)	CO	0-2500 ppm	<15 sn	500 ppm Sıfır havasında CO
	CO ₂	% 0-5		%5 CO ₂ , sıfır havasında

4.3. Testin Yapılışı

Test-cell ortamında yapılan motor testleri, motorların bakımdan sonra istenilen performansta çalışıp çalışmadıklarının kontrolü için uygulanan rutin bir işlemdir. Bu işlem boyunca motorlar fonksiyonel ve performans testleri adı verilen testlerden geçerler. Emisyon testleri de motorun daha çok fonksiyonel testleri sırasında gerçekleştirilmiştir. Aynı anda hem emisyon ölçüm sonuçları hem de motor parametreleri elde edilmiştir. Böylelikle, anlık olarak motor parametrelerine bağlı emisyon değişimleri incelenmiştir. Yapılan tüm testlerde motorlar hem düşük devir (rölanti), hem de farklı yüksek devirlerde belirli bir süre sabit motor devirlerinde çalıştırılmaktadır. Testi yapılan her dört tip motorun düşük devir aşamaları minimum rölanti ve approach (yaklaşma) rölantisi olarak ifade edilir. Yüksek devir çalışmaları ise testten teste ve motordan motora farklı olmakla birlikte % 65 ve % 99 N1 arasındaki devirlerde meydana gelmektedir. Test süreci aşağıda maddeler halinde özetlenebilir:

- Testten en az 3 saat önce FID analizörü çalıştırılarak analizör hücresinin 180°C'ye ısınması beklenmiştir. Analizörün ısınma süresi dolduktan sonra sırası ile kuru hava, taşıyıcı gaz ve hidrojen gazı analizöre iletilerek

analizör hücresinde alev oluşturulması sağlanmış ve analizörün hidrokarbon ölçümüne başlanmıştır.

- Emisyon ölçümüne başlamadan önce ısıtmalı hattın ve sistemdeki diğer hatların, bağlantı elemanlarının ısınması için testten bir süre önce elektrikli ısıtma ile hatlar ısıtılmaya başlanmıştır. Hat sıcaklıkları ölçüm öncesi ve ölçüm sırasında sıcaklık kontrol ünitesinden (*TCU*) kontrol edilmektedir.
- Motor çalıştırılmadan önce yazılımın motor verileriyle eş zamanlı sinyaller alıp almadığı kontrol edilmiştir. Yazılımın saati, fonksiyonel test sırasında motor parametrelerinin kayıt altına alındığı yazılımın saati ile aynı olarak ayarlanmıştır.
- *Dump* pump, testin başladığı andan yaklaşık bir- bir buçuk dakika sonra çalıştırılmıştır. Bunun nedeni ise motorun ilk ateşlendiği sırada yanma odası ya da diğer motor kısımlarında kalan bakımdan kalan yağ vb. nin yanması neticesinde kaynaklanan dumanın çok yüksek konsantrasyonlarda bileşen ihtiva etmesi – özellikle motorun ilk çalıştırılmasında HC, CO ve CO₂ ölçümlerinde yüksek derişimler görülmüştür- bunun da ilk başlarda ölçüm belirsizliğine ve örneklem hattının partikül vb. den tıkanmasına yol açmasındandır. Motorun ilk ateşleme yapıldığı anda egzoz dumanı yüksek konsantrasyonda yanmamış hidrokarbon içermektedir. Ayrıca örneklem sisteminin performansını etkilememesi ve sisteme zarar vermemesi için bu kritik noktadan sonra dump pump çalıştırılmış ve ölçüme başlanmıştır.
- Yüksek motor devirlerinde infrared analizörüne (CO/CO₂) gaz akışı fazla olmakta, düşük devirlerde ise diğer iki analizöre gaz akışı yeterli olmamaktadır. Diğer analizörlere giden gaz akışını sağlamak için *GCU*'den infrared analizörüne giden ya da dump pompasından tahliye edilen gazın akışı azaltılarak yeterli akış sağlanmıştır. Bu nedenle stabil gaz akışı ayarlaması yapılması önemli olmaktadır.
- Ölçüm esnasında CO/CO₂ analizörü ve diğer analizörler için uygun akış hızı ayarlaması gaz şartlandırma ünitesinde (*GCU*) bulunan rotametre ayarlarından yapılmıştır. Özellikle düşük devirlerde THC ve NO_x analizörlerine gaz akışı sağlanması hassas bir noktadır. Çünkü ölçüm

gazının (egzoz) bir kısmı güçlü *dump* pompası ile tahliye edilmekte bir kısmı da CO/CO₂ analizörüne gitmektedir.

- Analizör ölçüm aralıkları emisyonlar için uygun olduğundan egzoz gazının seyreltilmesine gerek kalmamıştır.
- Ölçümden önce analizörler uygun ve yukarıda belirtilen kalibrasyon gazları ile kalibre edilerek analizörlerin ölçümleri doğrulanmıştır.
- Yazılımdaki veriler test bitiminde kaydedilmiş, eş zamanlı olarak alınan motor parametreleri verileri ile birlikte sonuçlar için kullanılmıştır.

4.4. Yakıt Analizleri

Yapılan ölçümler sırasında motorda kullanılan yakıttan numuneler alınmış ve yakıt analizleri yaptırılmıştır. İstenen standarda uygun olarak alınan yakıt numunelerinin iki ayrı laboratuarda analizleri yaptırılmıştır. İlk laboratuarda yakıtın kalitatif ve kantitatif analizleri GC (Gas chromatography) metodu ile belirlenmiş olup GC sonuçlarına göre yakıtın ortalama molekül kütlesi 158.05 g/gmol bulunmuştur.

İkinci laboratuarda ise elementel analiz yöntemi ile yakıtın kütle bazında hidrojen ve karbon oranları belirlenmiştir. 29 Kasım 2013 tarihli numunenin kütlece yüzde 14.029'u Hidrojen, yüzde 82.342'si Karbon olarak bulunmuştur.

4.5. Emisyon İndisi Hesaplamaları

Motor testi sırasında, emisyon analizi yapıldığından uçağın normal çalışma koşullarında örnekler alınarak, min. rölanti, yaklaşma rölanti, yüksek irtifa itkileri, kalkış fazlarını ifade eden motor devirlerindeki emisyonlar ölçülmüştür. Ölçülen emisyon değerleri, anlık yakıt tüketimi verileri ile birlikte emisyon indislerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Emisyon indisleri; karbonmonoksit, azot oksitler ve toplam hidrokarbon için “gr emisyon/kg yakıt” cinsinden hesaplanmıştır. Emisyon indislerinin hesaplanmasında aşağıdaki formüller (4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7) kullanılmıştır (ICAO, 2008).

$$EI(X) = \frac{X \text{ kirleticisinin miktarı, gr}}{\text{kullanılan yakıt miktarı, kg}} \quad (4.1)$$

Karbonmonoksit emisyon indisi;

$$EI(CO) = \left(\frac{[CO]}{[CO_2] + [CO] + [HC]} \right) \left(\frac{10^3 M_{CO}}{M_C + (n/m) M_H} \right) (1 + T(P_0/m)) \quad (4.2)$$

Hidrokarbon emisyon indisi;

$$EI(HC) = \left(\frac{[HC]}{[CO_2] + [CO] + [HC]} \right) \left(\frac{10^3 M_{HC}}{M_C + (n/m) M_H} \right) (1 + T(P_0/m)) \quad (4.3)$$

Azot oksit emisyon indisi;

$$EI(NO_x)(NO_2 \text{ eşdeğeri}) = \left(\frac{[NO_x]}{[CO_2] + [CO] + [HC]} \right) \left(\frac{10^3 M_{NO_2}}{M_C + (n/m) M_H} \right) (1 + T(P_0/m)) \quad (4.4)$$

$$\text{Hava/Yakıt oranı} = (P_0/m) \left(\frac{M_{HAVA}}{M_C + (n/m) M_H} \right) \quad (4.5.)$$

$$(P_0/m) = \frac{2Z - n/m}{4(1 + h_{vol} - [TZ/2])} \quad (4.6)$$

$$Z = \frac{2 - [CO] - ([2/x] - [y/2x])[HC] + [NO_2]}{[CO_2] + [CO] + [HC]} \quad (4.7)$$

Burada;

M_{hava} = Kuru havanın moleküler kütlesi, 28,966 g (32R+28.1564S+44.011T) g

R = Kuru havadaki O₂ gazının konsantrasyonu, hacim olarak = 0,2095

S = Kuru havadaki N₂ gazının konsantrasyonu, hacim olarak = 0,7902

T = Kuru havadaki CO₂'nin konsantrasyonu, hacim olarak = 0,0003

M_{HC} = 1 mol HC nun moleküler kütlesi, CH_4 eşdeğeri olarak alınır. 16,043g
 M_{CO} = 1 mol CO nun moleküler kütlesi, 28,011 g
 M_{NO_2} = 1 mol NO_2 'nin moleküler kütlesi, 46,008 g
 M_C = 1 mol C atomunun kütlesi, 12,011 g
 M_H = 1 mol H atomunun kütlesi, 1,008 g
[HC]= Egzoz gazı içeriğindeki HC'nin ortalama konsantrasyonu, ppm C(vol/vol)
[CO]= Egzoz gazının ortalama CO konsantrasyonu, ppm (vol/vol), ıslak bazda
[CO₂]= Egzoz gazının ortalama CO₂ konsantrasyonu, ppm (vol/vol), ıslak bazda
[NO_x]= Egzoz gazının ortalama NO_x(NO+NO₂) konsantrasyonu, ppm (vol/vol), ıslak bazda
[NO]= Egzoz gazının ortalama NO konsantrasyonu, ppm (vol/vol), ıslak bazda
[NO₂]= Egzoz gazının ortalama NO₂ konsantrasyonu, ppm (vol/vol), ıslak bazda
m = Yakıt molekülündeki C atomları sayısı
n = Yakıt molekülündeki H atomları sayısı
x = Egzoz içeriğindeki HC molekülünde bulunan C atomları sayısı (1)
y = Egzoz içeriğindeki HC molekülünde bulunan H atomları sayısı (4)

Emisyon analizi sırasında yani motor testi yapılırken kaydedilen atmosfer koşulları hesaplamalarda kullanılmıştır.

h_{vol} = Dış ortam havasının nemi, su/kuru hava, hacim olarak oranı
n/m değerine karşılık gelen yakıtın hidrojen-karbon oranı (H/C) 23/12 olarak kerosenin $C_{12}H_{23}$ formülündeki katsayılar alınmıştır. Bu çalışma sırasında yakıt örneklerinin analiz sonucuna göre; yakıtın ortalama molekül kütlesi gaz kromatografi yöntemi (GC) ile 158.05 gr/mol bulunmuştur. Elementel analiz sonucuna göre yakıtın kütlece yüzde 14.029'u H, yüzde 82.342'si C olarak alındığında, yakıtın molekül formülü $C_{10.84}H_{20.53}$ ile H/C oranı 1.89 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 23/12 (1.91) değerine yakın olduğu için yakıtın $C_{12}H_{23}$ olduğu kabulü ile hesaplamalarda n/m oranı 23/12 olarak alınmıştır.

Emisyon indisi hesabı için üçüncü ve daha basit bir yöntem ise formül 4.8. olup bu formül literatürde de oldukça fazla yayında kullanılmaktadır (Herndon vd., 2006; Johnson vd., 2008; Timko ve ark. 2010): Bu yöntemle hesaplanan emisyon indisleri bulgular kısmında APEX (Aircraft Particle Emissions Experiment) emisyon indisi olarak ifade edilecektir.

$$EI_x \left(\frac{\text{g}}{\text{kg yakıt}} \right) = \frac{X \text{ (ppm)}}{\text{CO}_2 \text{ (ppm)}} \times \left(\frac{MW_X}{MW_{\text{CO}_2}} \right) \times 3160 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg yakıt}} \right) \quad (4.8)$$

Formül 4.8’de yer alan 3160 sayısı için; literatürde uçak yakıtı olarak bilinen kerosenin bir kg’ının yanmasına karşılık 3160 g CO₂ üretildiği kabul edilmiştir. Ayrıca bu kabul yanma işleminin tam olarak gerçekleştiği ve 1 kg yakıtın tamamının yanarak CO₂’ye dönüştüğü varsayımıyla yapılmıştır.

Hesaplanan emisyon indislerinin deniz seviyesi şartlarındaki emisyon indislerine düzeltilmesinde alt paragraflarda anlatılan yöntem uygulanmıştır.

Literatür incelendiğinde yapılan emisyon ölçümleri büyük oranda LTO fazlarını kapsadığından düzeltme için deniz seviyesi şartları referans alınmıştır. Bu çalışmada da daha önceki çalışmalarla ve ICAO veri tabanındaki değerlerle karşılaştırılabilmesi için deniz seviyesi şartlarına göre emisyon indisi düzeltmesi yapılmıştır. ICAO Annex 16 belgesi Appendix 3 kısmında deniz seviyesi şartlarına düzeltme için yöntem verilmiştir. Ancak bu yöntemle göre hava yakıt oranı, yanma odası giriş sıcaklık ve basıncı gibi motora özel oldukça zor bulunan verilere ihtiyaç vardır. Ek olarak bu verilerin emisyon ölçümünün yapıldığı atmosfer şartlarındaki ve deniz seviyesi atmosfer şartlarındaki değerlerine de ihtiyaç vardır. Ayrıca gerçek yakıt hava oranı verisi mevcut değildir ve bu verinin de yine deniz seviyesi şartlarındaki değerinin bilinmesi gerekmektedir.

Bütün bu nedenlerden dolayı, emisyon indislerinin referans koşullara düzeltilmesinde literatürde de sıklıkla kullanılmış olan Boeing Fuel Flow-2 (BFF2) yöntemi (Schulte ve ark., 1997; DuBois ve Paytner, 2006) kullanılmıştır. Ayrıca bu yöntem referans emisyon indislerinin belirli irtifa emisyon indislerine çevrilmesinde de kullanılmaktadır. Gerçek uçuş koşullarında emisyon indislerinin belirlenmesinde önce düzeltilen deniz seviyesi emisyon indisleri yüksek irtifadaki şartlara göre düzeltilmiş, ardından o irtifadaki yakıt tüketiminden ve emisyon indisinden tüm fazlar için toplam emisyonlar hesaplanmıştır.

Uçuş esnasındaki mevcut yakıt akışının deniz seviyesi yakıt akışına düzeltilmesinde BFF2’de deniz seviyesi referans yakıt akışı, F_{ref} , belirli irtifadaki mevcut yakıt akışından (F_a), 4.9. eşitliği ile bulunur (Schulte ve ark., 1997)

$$F_{ref} = F_a \delta a^{-1} \theta a^{3.8} \exp(0.2 Ma^2) \quad (4.9)$$

Burada $\theta_a = T_a/T_0$ ve $\delta_a = p_a/p_0$. T_a ve p_a mevcut dış sıcaklık ve basınç, T_0 ve p_0 deniz seviyesi sıcaklık ve basıncı (deniz seviyesi sıcaklık 288.15^0K ve basınç 1013.25 hPa) ve $\exp(0.2 \text{ Ma}^2)$ mach sayısı düzeltme formülünü ifade etmektedir.

Deniz seviyesi referans emisyon indisleri; 4.9. formülünden elde edilen referans yakıt akışına karşılık gelen, ölçüm sonucu elde edilen emisyon indislerinden interpolasyon yöntemi ile bulunur.

Mevcut CO , NO_x ve HC emisyon indislerinin belirli irtifadaki emisyon indislerine çevrilmesinde aşağıdaki formüller (4.10, 4.11 ve 4.12) kullanılır (DuBois ve Paytner, 2006).

$$\text{EICO}_{\text{Alt}} = \text{EICO}_{\text{ref}} \left(\frac{\theta_a^{3.3}}{\delta_a^{1.02}} \right)^x \quad (4.10)$$

$$\text{EIHC}_{\text{Alt}} = \text{EIHC}_{\text{ref}} \left(\frac{\theta_a^{3.3}}{\delta_a^{1.02}} \right)^x \quad (4.11)$$

$$\text{EINO}_{x\text{Alt}} = \text{EINO}_{x\text{ref}} \left(\frac{\delta_a^{1.02}}{\theta_a^{3.3}} \right)^y e^H \quad (4.12)$$

Burada x ve y sabitleri için 1.0 ve 0.5 değerleri kullanılabilir.

NO_x hesaplaması için ilave olarak nem düzeltme faktörü, H 'nin bilinmesi gerekmektedir. BFF2 metodunda $H = \exp(-19(q-0.00634))$ formülünden hesaplanmaktadır. Burada q , kuru havadaki su buharı karışma oranıdır (kg su buharı/kg kuru hava). ICAO emisyon veri tabanında deniz seviyesi bağıl nem %60 olarak kabul edilmiştir, bu durumdaki nemlilik oranı $0.00634 \text{ kg H}_2\text{O/kg}$ kuru havaya eşdeğer olmaktadır. Deniz seviyesi dışındaki yüksekliklerde değişik nem durumları hesaplamak ve bu noktadan da NO_x emisyon indisi düzeltimi yapabilmek için öncelikle sırasıyla 4.13, 4.14 ve 4.15 formülleri kullanılarak nem düzeltimi yapılması gerekmektedir.

$$T_{\text{ambc}} = (T_{\text{amb}}/1.8) - 273.15 \quad (4.13)$$

$$P_{\text{sat}} = 6.107 \times 10^{((7.5 \times T_{\text{ambc}})/(237.3 - T_{\text{ambc}}))} \quad (4.14)$$

$$q = \frac{(0.62197058 \times \text{RH} \times P_{\text{sat}})}{((P_{\text{amb}} \times 68.9473) - (\text{RH} \times P_{\text{sat}}))} \quad (4.15)$$

Uçulan irtifadaki dış basınç, P_{amb} (pa) 4.16 denkleminde hesaplanmıştır.

$$P_{\text{amb}}(\text{Pa}) = 101325 \times (1 - 2.25577 \times 10^{-5} h)^{5.25588} \quad (4.16)$$

Burada, h , metre cinsinden irtifayı ifade etmektedir (Anonim).

4.6. Kemilüminesans Ölçümüne Dayalı NO_x Analizöründe Su Girişiminin NO_x (NO-NO₂) Ölçümlerine Etkisinin İncelenmesi

Bu çalışmada, Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Fonu tarafından desteklenen 1209F148 nolu Proje kapsamında yapılan analizlere ait sonuçlar yer almaktadır.

Yanma süreçlerinden kaynaklanan NO-NO₂-NO_x konsantrasyonlarının ölçülmesinde en yaygın kullanılan yöntem kemilüminesans (kimyasal ışımaya) yöntemidir. Bu yöntemde örnek gazındaki NO'nun ozon (O₃) ile tepkimesi sonucu açığa çıkan kimyasal ışımaya şiddetinin ölçülmesi ile NO konsantrasyonu ölçülür. Yanma gazındaki NO₂ bir dönüştürücü ile ölçümden önce NO formuna dönüştürülür. Atık gazda H₂O moleküllerinin varlığında ölçüm hücresinde uyarılmış NO₂ bu gazlarla etkileşir ve ışımaya yapmak yerine çarpışma ile enerji transferi gerçekleşir. Bu durumda daha düşük sinyal ve dolayısıyla düşük NO_x konsantrasyonu gözlenir.

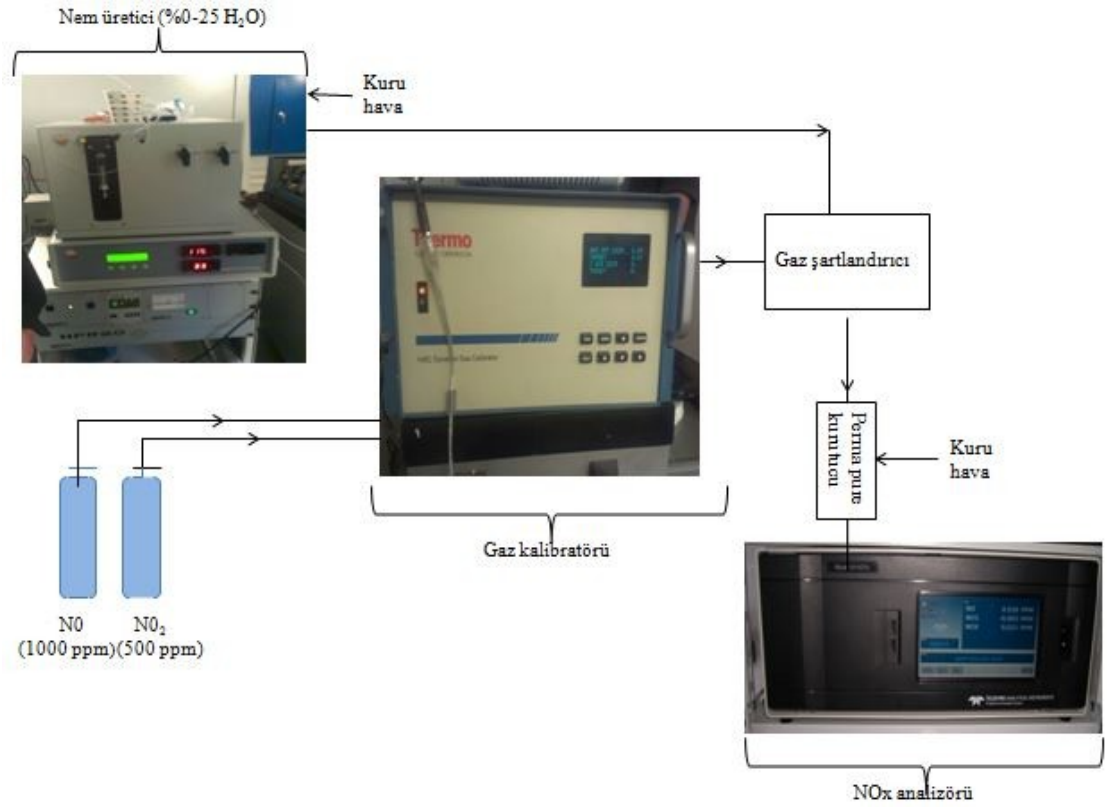
NO_x ölçümünde kullanılan kemilüminesans analizöründe H₂O' den kaynaklanan söndürme etkisini giderebilmek için kullanılan perma pure kurutucunun, su buharını tutma verimini gözlemek ve kurutucu kullanılmadığı durumda NO_x'da (NO₂ ve NO) meydana gelen ölçüm sapmalarını görebilmek için deneyler yapılmıştır. NO₂ ve H₂O'nun ölçüm hücresinde etkileşimini azaltmak için ölçüm hücresinde basınç ve "quenching effect" denilen girişim etkisi azaltılabilir. Seçici Membran (perma pure) kullanarak NO_x ölçümü öncesinde, su buharının örneklem sisteminden adsorplanarak ayrılması ile bu etkinin giderilmesi amaçlanmıştır. NO₂'nin suda çözünme veya adsorplanma durumu nedeni ile su buharının yoğunlaşması ısıtmalı hat ile engellenmiştir. Çünkü NO₂ kaybı analizörde düşük miktarda NO₂ ölçümlerine neden olmaktadır.

Bu çalışma ile, NO_x ölçümünde kullanılan kemilüminesans tekniğine dayalı ölçüm yapan analizörde "quenching effect" e neden olan H₂O'nun giderilmesinde seçici membran yönteminin kemilüminesans ölçümlerinde uygulanabilirliğinin ve NO_x analizörünün çalışma veriminin artırılması hedeflenmiştir.

Çalışmada, referans gaz karışımları hazırlanmış ve hazırlanan gaz karışımı NO_x analizöründen önce yerleştirilen seçici membrandan (perma pure kurutucu)

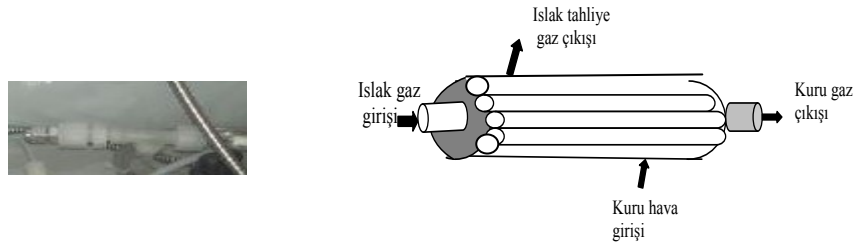
geçirilerek analizörde NO ve NO₂ ölçülmüştür. Daha sonra, analizörden önce kurutma işlemi yapılmadan gaz karışımları analizörde ölçülmüştür.

Kemilüminesans analizöründe nemden kaynaklanan girişim etkisini ölçmek için, bilinen konsantrasyonlarda NO₂-H₂O ve NO-H₂O gaz karışımları hazırlanmıştır. Bu gaz karışımlarını hazırlamak için 1000 ppm NO tüpü (sıfır azotta) ve 500 ppm NO₂ (sıfır azotta) kullanılmış, karışımda istenen nem konsantrasyonu % 0-25 konsantrasyonlarda H₂O üreten nem üretici tarafından sağlanmıştır. Azot bileşikleri tüpleri konsantrasyonu Teledeyne 9110 marka NO_x analizörünün ölçüm aralığında NO₂ ve NO konsantrasyonları istenen oranlarda, kuru hava ile seyreltilerek gaz karışımları şartlandırılmıştır. İstenen konsantrasyonlarda H₂O ve NO (ya da NO₂) gaz karışımı Thermo marka (Model 146C Dynamic Gas Calibrator) gaz kalibratörde hazırlanmıştır. Analizöre gaz karışımını, uygun basınç ve gaz akışında sağlamak için gaz şartlandırıcı analizörden önce yer almıştır. Bilinen konsantrasyonlarda hazırlanan H₂O-NO₂ ve H₂O-NO içeren gaz karışımları kemilüminesans analizöründen önce yerleştirilen perma pure- gaz kurutucu ile H₂O yoğunlaştırılmadan (ısıtmalı hat kullanarak) nemin örneklem hattından ayrılması ile NO₂ veya NO gazı kaybı olup olmadığı ile ilgili analizler yapılmıştır. Aynı konsantrasyonlarda gaz karışımları analizörden önce kurutma yapılmadan ölçümler tekrarlanmıştır. Bu deneylerle birlikte kurutucunun performansı ve verimliliği ölçülerek, kurutucu ile ayrılan H₂O gazındaki bileşen NO_x (NO₂-NO) içeriği, NO ve NO₂'nin su ile birlikte kurutucu ile tutulup tutulmadığı bu şekilde görülmüştür. Ölçüm sistemi Şekil 4.14'te anlatılmaktadır.



Şekil 4.14. NO_x analizörü girişim etkisi test düzeneği

Nem üretici, kütle dengeli yöntemine göre istenilen gaz karışımına buhar kazandırmak için kullanılmıştır. Çalışma yönteminde, sisteme mikro şırınga ile suyu enjekte edip kuru hava ile kütle dengeliğinden birim zamanda, birim hızda su buharı üretilir. Sistemde bulunan sıcaklık kontrol ünitesi, yoğuşmayı önlemek için mevcuttur.



Şekil 4.15. Perma pure kurutucu ve çalışma prensibi

Perma pure gaz kurutucu, iki zıt yönlü gaz akımı arasında su buharı transferini gerçekleştiren kabuk ve çuklu tüpler içerir (Şekil 4.15.). Kurutucu bir dış boru ile çevrili polimer boru demetlerinden oluşur. Kurutucunun dış yüzeyi üzerinde akan kuru gaz, boru içindeki ıslak gaz akımından su buharını ayıklar. Su buharı ayrılmış kuru gaz analizöre iletilir.

NO_x analizöründe H₂O'dan kaynaklanan girişim etkisi analizlerine göre perma pure kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için nemin NO ve NO₂ konsantrasyonlarına etkisi Çizelge 4.3. ve 4.4.'de gösterilmektedir. Perma pure kurutucu, kuru havanın örnek gaz akışına ters yönlü akarak difüzyonla nem transferi prensibine göre çalışmaktadır. Çalışma sırasında kurutucu her durumda takılı kalmıştır ancak bazı analizlerde kurutucuya kuru hava verilmemiştir. Bu durumda kuru havanın gaz akışı da önemlidir ve gaz kontrol ünitesinden gaz akışı ayarlanmıştır.

Nem üretici %0-25 aralığında H₂O üretilebildiği halde yoğuşma sorunu nedeniyle yüksek yüzde konsantrasyonlarda çalışılmamıştır. Nem üreticide istenen yüzde konsantrasyonlarda H₂O üretildikten sonra gaz kalibratöründe NO (ya da NO₂) derişim ayarlandıktan sonra nemli hava ile karıştırılmıştır. Analizör öncesinde perma pure kurutucuya gaz akışı verilerek kurutucunun nem tutma verimi ve kemilüminesans analizöründe nemin ölçümlere etkisi gözlenmiştir. Diğer taraftan nemle birlikte kurutucudan NO ve NO₂ gazının adsorbsiyonunun olup olmadığı test edilmiştir.

Çizelge 4.3. H₂O girişim etkisinin NO konsantrasyonuna etkisi

Gaz örneğindeki H ₂ O (% kons.)	Gaz örneğindeki NO (ppm)	Kuru hava akış hızı (ml/dak)	Analizörde ölçülen değer (ppm)	% Sapma
5.7	120.5	2040	101.9	15.4
5.7	120.5	1463	94.8	21.3
5.7	121.5	0	89.9	26.0
0	40.0	>2040	27.2	32.0
0	40.1	>2040	26.9	32.9

Çizelge 4.3.'de özetlenen analiz sonuçlarına göre H₂O girişim etkisinin NO sonuçlarına doğrudan etkisi olduğu söylenebilir. NO-H₂O gaz karışımındaki en büyük sapma perma pure kurutucu kullanıldığı ancak kuru hava verilmediği durumda gözlenmiştir. Kuru hava akış hızının yüksek ya da düşük olması da NO ölçümlerinde sapmayı etkilemektedir. Öyle ki, yüksek kuru hava akışında NO sapması düşük akışa göre daha azdır. Kuru hava akış hızı ne kadar yüksek olursa NO ölçümleri daha doğru ve hassas olacaktır. H₂O girişim etkisi NO ölçümlerinde

negatif yönde eğilime neden olmaktadır. Perma pure kurutucu kullanıldığı takdirde bu negatif eğilim azalmaktadır.

NO-H₂O gaz karışımında %5.7 H₂O varlığında NO'nun gerçek konsantrasyonunda en fazla %32 oranında sapma göstermiş, en az sapma oranı %15.4 ile en yüksek kuru hava akış hızında olmuştur. Perma pure kurutucu ıslak gaz karışımındaki nemi tutmasına rağmen yine de bir miktar NO kaybı söz konusu olduğu sonucu çıkarılabilir.

Çizelge 4.4. H₂O girişim etkisinin NO₂ konsantrasyonuna etkisi

Gaz örneğindeki H ₂ O (% kons.)	Gaz örneğindeki NO ₂ (ppm)	Kuru hava akış hızı (ml/dak)	Analizörde ölçülen değer (ppm)	% Sapma
0	109.2	1463	78.2	28.4
0	21.6	>2040	16.0	25.9
5.7	21.6	>2040	16.8	22.2
5.7	21.6	0	14.8	31.5
10.5	45.1	>2040	35.4	21.5
10.5	45.1	0	31.1	31.0

Kemilüminesans analizöründe nemden kaynaklanan girişim etkisi üzerine yapılan çalışmalara göre NO₂'nin perma pure kurutucunun duvarlarından nemle birlikte adsorblandığı ifade edilmiştir (Campbell ve ark., 1982). Bu çalışmada da su buharı perma pure kurutucuda giderilmiştir, ancak nemle birlikte bir miktar NO₂'nin kaybı da söz konusudur. Çizelge 4.4.'de görüldüğü üzere en fazla NO₂ kaybı %31.5 olmuştur. Bunun nedeni H₂O'nun, kemilüminesans analizörde üçüncü bir bileşen olarak NO₂'nin yaydığı kimyasal ışımayı söndürücü etki yapması ile ölçüm sonuçlarını negatif yönde etkilemesidir. Yapılan aynı şartlardaki diğer analize göre de nemle birlikte NO₂ gaz karışımında sistemde perma pure kurutucu kullanıldığı durumda ve yüksek kuru hava akışında; NO₂ kaybının daha az olduğu (%22.2) görülmüştür. Sonuç olarak perma pure kurutucu kullanılarak örnek gaz karışımındaki nem giderildiğinde nemle birlikte NO₂ kaybı söz konusudur. Ancak bu kayıp perma pure kullanılmadığı durumda daha fazladır.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. Emisyon Ölçüm Sonuçları

Yürütülen 25 motor testi esnasında; motor sabit bir devirde çalışırken bir hızlanma veya yavaşlama sonrasında yeni bir sabit devre eriştiğinde, her ne kadar motor parametreleri bu stabil çalışma değerlerinde görülmeye başlanmış olsalar da, ölçülen bazı emisyon değerleri, kısa bir süre daha halen bu stabil çalışma değerlerine yaklaşma durumunda olabilmektedir. Özellikle analizörlerin cevap sürelerinin farklı olması nedeni ile sabit devirden belirli süre sonrası hesaplamalara dahil edilmiş ve dikkate alınmıştır. Örneğin HC analizöründe cevap süresinin 180 saniye sonra olması, HC ölçümlerinde sabit devir başladıktan sonraki 180 saniyeden itibaren HC değerleri o sabit deviri temsil etmiştir. Emisyon verileri ve motor parametrelerinin anlık olarak kaydedildiği sistem arasında cevap süresi arasında 30-60 sn arası sapma gözlenmiştir. Bu aradaki süre farkından kaynaklanan hata nedeniyle verilerin dengelenmesi hususunda, emisyon verilerinin ilk 40 saniyesi hesaplamalarda ele alınmamıştır. Değerler belirli devirde stabil olduğu anda alınmaya başlanmıştır, dolayısıyla stabil çalışma fazının özellikle ilk zamanlarında, emisyon değerlerinde, o fazda olması gereken değerlerden daha yüksek veya daha düşük değerler gözlenebilmektedir. Her ne kadar stabil çalışma fazının uzun sürmesinden dolayı bu farklı değerler ortalamalar üzerinde ciddi bir etki yaratmasalar da standart sapmaların büyümesine ve analizin sonuçlarının etkilenmesine yol açabilmektedir. Bu problemi çözebilmek için motorun stabil çalışma fazına erişmesinden itibaren belirli bir süredeki verilerin ihmal edilmesi yöntemi uygulanmıştır. Burada amaç stabil çalışma fazındaki emisyon üretimini en iyi şekilde belirleyebilmek olduğundan, böyle bir yöntemi kullanmak uygundur. Ancak geçiş aşamalarının da dahil olduğu motorun tüm devirlerinin emisyon üretimi ile ilişkisinin araştırıldığı analizlerde tüm emisyon verileri olduğu gibi dikkate alınmıştır. Motor testleri esnasında N1 motor devri ile anlık CO, CO₂ ve NO_x emisyonlarının değişimi Ek-4'te yer alan grafiklerden görülebilir.

Yapılan farklı analizler sonucunda ilk 40 saniyedeki emisyon verilerinin dikkate alınmaması yeterli olmuştur. Ancak HC analizörlerin reaksiyon süresinin daha uzun olması nedeniyle stabil faza geçişten itibaren 180 saniye sonraki veriler dikkate alınmıştır. Emisyon indisi hesaplamalarında doğru sonuçları elde etmek için HC için 180 saniye sonraki veriler, CO, CO₂, NO_x ve NO₂ için 40 saniye sonraki veriler alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

İlerleyen bölümlerde rölanti çalışmasının, motorun ilk çalışmaya başlamasındaki rölanti (minimum cold idle – MinC) ile test işleminin tamamlanıp, motorun kapatılmasından önce çalıştığı rölanti devirleri (minimum hot idle– MinH) şeklinde ifade edilmiştir. Buradaki amaç, motorun soğuk hali ile sıcak hali arasında emisyonlarda gözle görülür bir fark olup olmadığının araştırılmasıdır.

Yapılan 25 emisyon ölçümü sırasında, Test05 ve Test09’da, örneklem gazının analizörlere ulaşımını sağlayan pompaların akış ayarlamaları ile ilgili bir aksaklık meydana gelmiştir. Test05 esnasında, neredeyse AppC sonuna kadar NO_x ve HC analizörleri için egzoz örneklem akışı sağlanamamıştır. Bu esnada CO/CO₂ analizör örneklem hattında herhangi bir problem yaşanmamıştır, çünkü bu hattın akışı *dump pump* ile kontrol edilmektedir. Problemin sebebi, CO/CO₂ için yapılan akış ayarının aşırı yüksek olmasından dolayı, normalde NO_x ve HC analizörlerine örneklem transferi sağlayan *heat pump* tarafından alınması gereken gazın bir kısmının *dump pump* tarafından alınmasıdır. Problem tespit edildikten sonra, *dump pump* akışı düşürülerek *heat pump*’ın kontrol ettiği hatta olan gaz akışı yavaş yavaş artırılmıştır. Bu problem sebebiyle, MinC fazının tamamında, AppC fazının ise son bir dakikasına kadar bu iki fazda NO_x ve HC ölçümü gerçekleştirilememiştir. AppC’nin son bir dakikasında NO_x ölçümü yapılabilmiş olup, HC için yeterli süre olmadığından HC ölçümü gerçekleştirilememiştir. Benzer durumla Test09’da da karşılaşmıştır. Yine aynı şekilde MinC’nin tamamında, ve AppC’nin de belirli bir süresinde NO_x ve HC ölçümleri gerçekleştirilememiştir. Bu hatalara özellikle düşük devirlerde rastlanmıştır.

ICAO’ya göre LTO döngüsünün her bir fazının belirli sürelerde gerçekleştiği gibi belirli bir motor gücü de vardır. Rölanti, yaklaşma, tırmanma ve kalkış fazları için ICAO motor gücü değerleri sırasıyla %7, %30, %85 ve %100 olarak tanımlanmıştır. Ancak test-cell koşullarında her uçuş fazını temsil eden

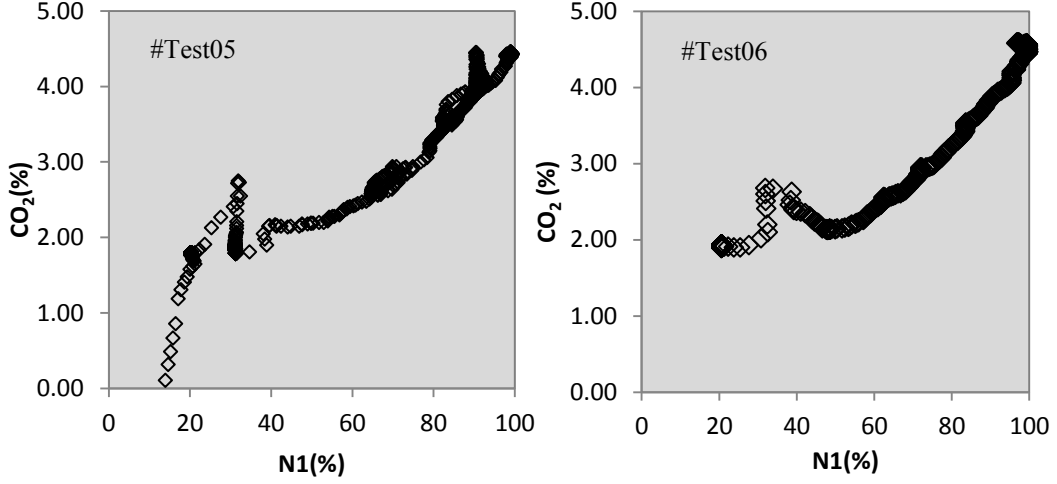
itkiler farklı olmaktadır. Örneğin %30 itki ICAO approach itkisini tanımlarken, test-cell ölçümlerinde approach rölanti fazına karşılık gelmektedir. ICAO Test-cell ölçümlerinde kalkışı temsil eden itki %100'e ulaşmamaktadır (%90-98). ICAO da tanımlanan LTO fazlarının isimlerinin bazıları bu çalışmada aynı olsa da, bu fazlara ilişkin motor itkilerinde farklar bulunmaktadır.

5.1.1. CO₂ emisyonu ve motor parametreleriyle ilişkilendirilmesi

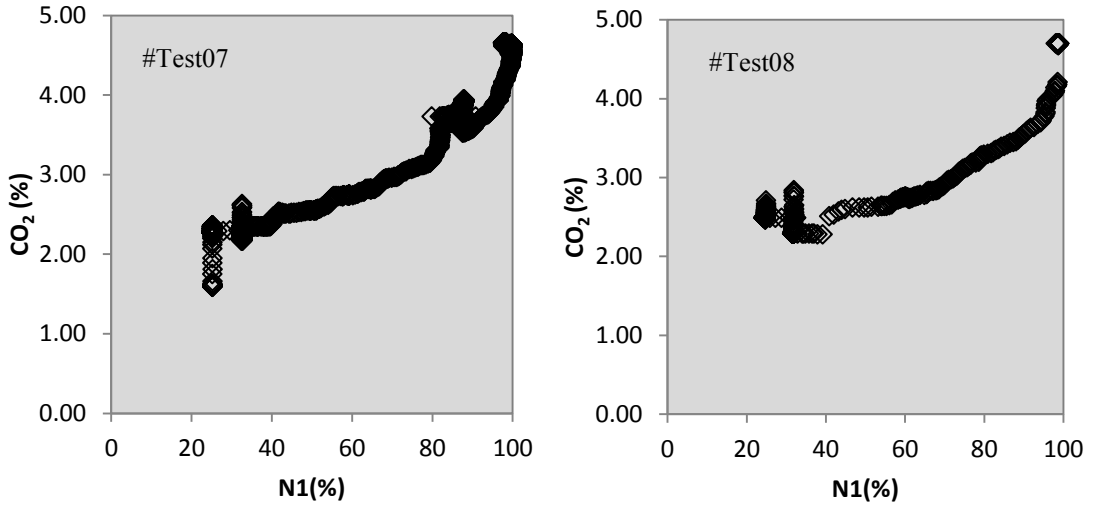
Yapılan tüm ölçümlere göre, CO₂ konsantrasyonu ile motor devri (N1) arasında doğrusal bir değişim bulunmaktadır. N1 devri arttıkça tüm testlerde CO₂ konsantrasyonunun de arttığı gözlenmektedir. Motorun CO₂ konsantrasyonlarının düşük motor devirlerinde ortalama %1.68 ile %2.57 arasında değiştiği saptanmıştır. Burada minimum rölantiyi temsil eden motor devrinin, motordan motora ve teste göre farklı olması da önemlidir. Ancak CO₂ konsantrasyonu ile motor gücü arasında beklenildiği gibi doğru bir orantı gözlenmiş olup, CO₂ konsantrasyonu en fazla %5.03 ile kalkış N1 devrinin %98 değerinde olduğu Test10'da ölçülmüştür. Kalkış N1 değeri %98 olan Test13'de ise kalkışa ait en düşük CO₂ konsantrasyonu %4.39 olarak ölçülmüştür.

CO₂ konsantrasyonu minimum ve yaklaşma rölanti hızları için detaylıca incelenmiştir. Bu inceleme göstermiştir ki yaklaşma rölantisindeki CO₂ konsantrasyonu, minimum rölantiye göre az bir miktar daha düşüktür. Ayrıca bu durum hem soğuk rölanti olarak tabir edilen motorun ilk çalışması esnasındaki rölantide, hem de sıcak rölanti olarak tabir edilen testin sonunda motorun soğuması için çalıştırıldığı rölanti hızında aynen bu şekilde gözlenmiştir. Bu konudaki istisnalar Test01, Test17, Test21 ve Test25'in soğuk rölanti çalışması esnasında gözlenmiştir. Buna göre sadece bu anda minimum rölanti CO₂ konsantrasyonu yaklaşma rölantisinden daha düşük değerde ölçülmüştür. Bu istisnai durum, değerlerin birbirine çok yakın olmasından dolayı ve sadece ilk ölçümde gözlenmesi nedenleri ile genel kanıyı etkilememiştir. Ayrıca yine bu testin sıcak rölanti durumunda da eğilim diğer testlerde olduğu gibi gerçekleşmiş, yani yaklaşma rölantisinde minimum rölantiye göre daha düşük CO₂ konsantrasyonları gözlenmiştir. Minimum idle fazından yüksek devirlere

çıkıldıkça CO₂ konsantrasyonunun da doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir. Bazı testlere ait N1'e bağlı CO₂ konsantrasyonu Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.'de sunulmaktadır.

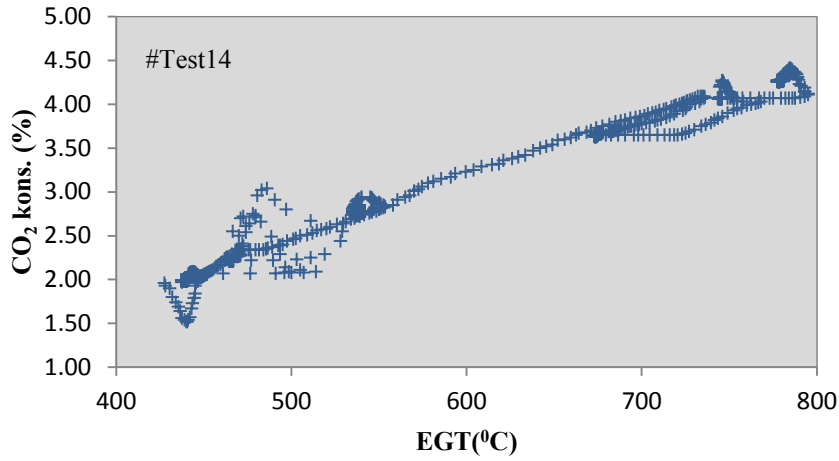


Şekil 5.1. CFM56-7B26 motoru CO₂'nin N1 ile değişimi



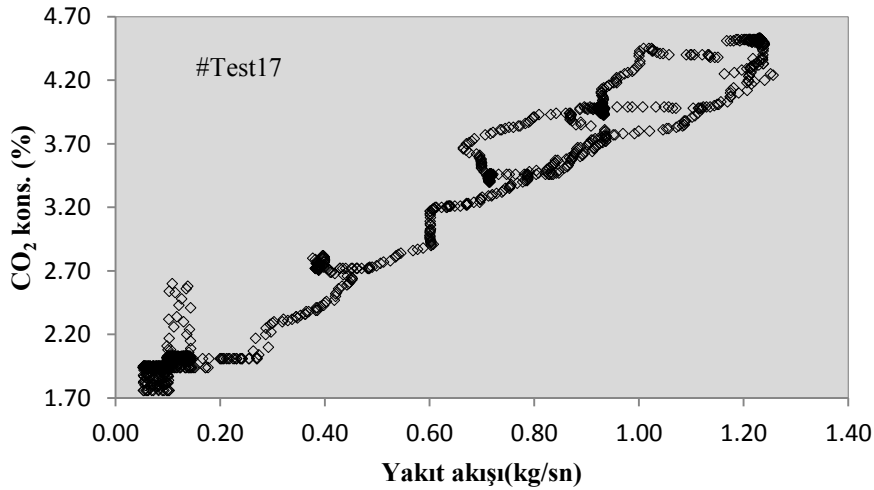
Şekil 5.2. CFM56-3B1 motoru CO₂'nin N1 ile değişimi

CO₂ konsantrasyonu ile yakından ilişkili motor parametrelerinden biri de EGT (Exhaust gas temperature) yani egzoz gazı sıcaklığıdır. CO₂ konsantrasyonları ve EGT parametresi Şekil 5.3.'te gösterilmektedir. Bütün testlerdeki EGT değerlerine bakılacak olursa hem soğuk hem de sıcak rölanti değerlerinde minimum rölantideki EGT değerlerinin yaklaşma rölantisindeki EGT değerlerinden daha yüksek olduğu görülecektir.



Şekil 5.3. CO₂-EGT değişimi (CFM56-7B24 motoru)

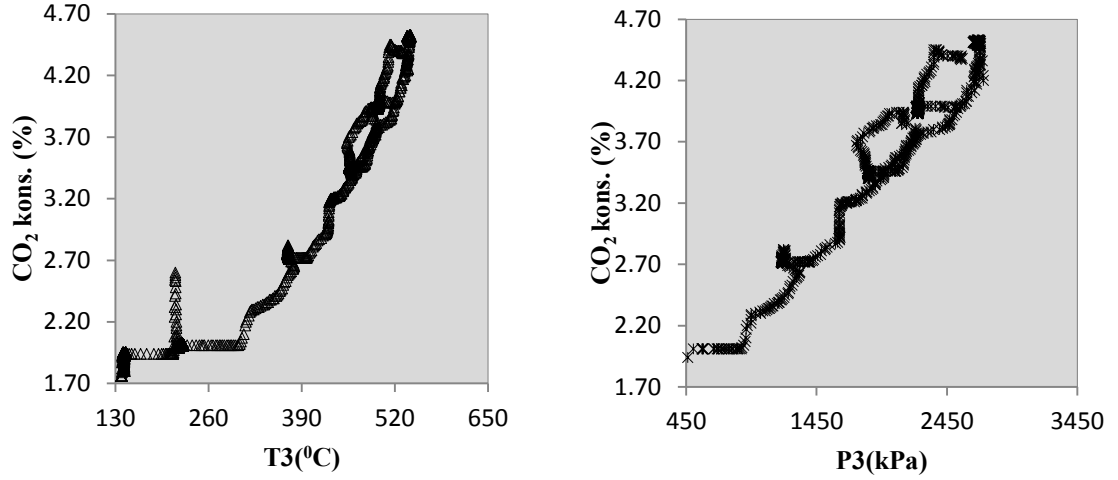
Yanma odasına giren yakıtın akış hızı arttıkça, CO₂ konsantrasyonu artacağından yakıt akışı ile CO₂ emisyonu artışı arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. CO₂ yakıttaki C atomlarının O₂ ile kimyasal reaksiyonu sonucu oluşmakta, yanma odasında özellikle devir artışı ile birlikte yakıt akışı arttığı için oluşan reaksiyonla CO₂ de artmaktadır. Yakıt artışı ile birlikte CO₂ emisyonu artışı bütün testlerde görülmüştür, Şekil 5.4.'de yakıt akışı ile CO₂ değişimi arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 5.4. CO₂-yakıt akışı değişimi (CFM56-7B26 motoru)

CO₂ konsantrasyonunun motor parametrelerinden, yanma odası giriş sıcaklık ve basıncı ile değişimi Şekil 5.5.'te gösterilmektedir. Yanma odasına giren havanın yüksek basınç kompresöründen sonra basıncının yüksek olduğu

görülmektedir. Yapılan analizler yanma odası giriş sıcaklığı ve basıncı ile birlikte CO₂ konsantrasyonunda da doğrusal bir artış gözlenmiştir.

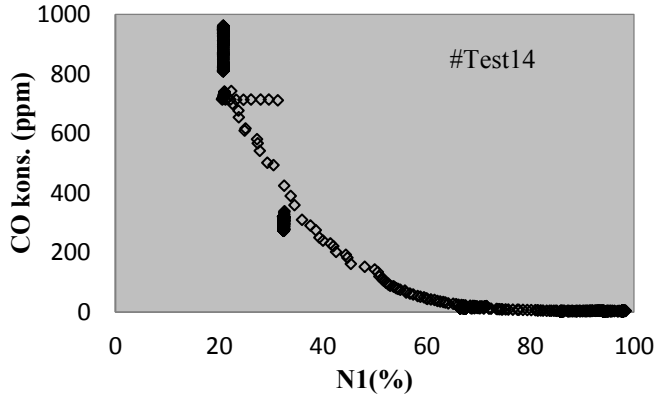


Şekil 5.5. CO₂ konsantrasyonunun yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi (Test17)

Bütün testler için N1'e bağlı CO₂ değişimi ve bazı testler için egzoz gaz sıcaklığı, yakıt akışı, yanma odası giriş sıcaklığı, yanma odası giriş basıncı ile CO₂ değişimi Ek-1'deki grafiklerde verilmektedir.

5.1.2. CO emisyonları ve motor parametreleriyle ilişkilendirilmesi

CO konsantrasyonları 25 emisyon ölçümü içerisinde en düşük ortalama 1.36 ppm ile %98 N1 itkide Test25'de, en yüksek 1030.8 ppm ile Test09'da (1040 rpm motor devrinde) minimum rölanti devirlerinde gözlenmiştir. Motor devri minimum idle fazından %99 motor devrine yükseldikçe CO konsantrasyonu çoğunlukla azalmıştır. Testlerde minimum rölanti fazından yaklaşma rölanti fazına yükseldikçe CO konsantrasyonu %40-50 aralığında azalmaktadır. CO konsantrasyonunun N1 ile değişimi -7B24 motorunda yapılan testte gösterilmektedir (Şekil 5.6.).

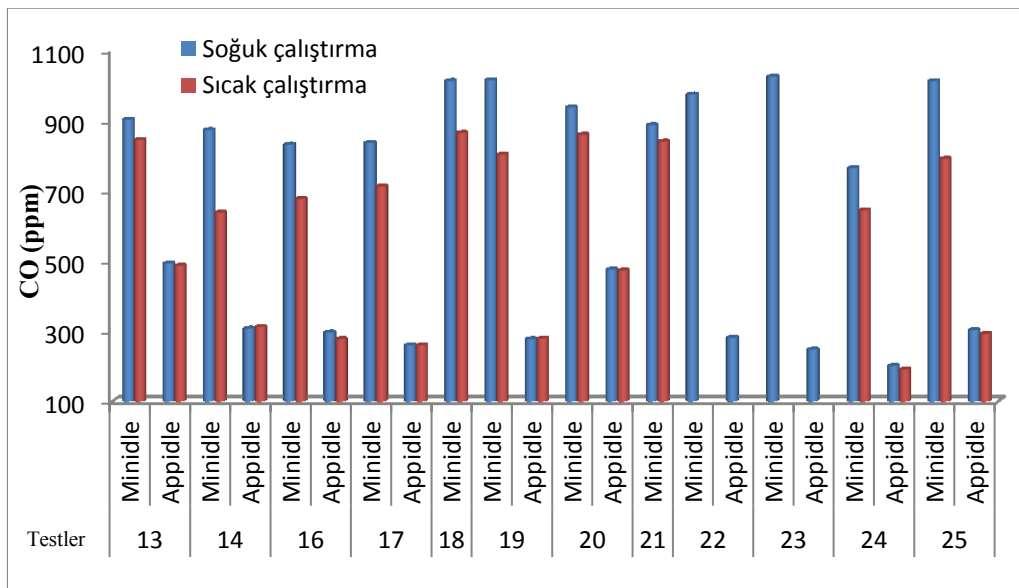


Şekil 5.6. CFM56-7B24 motoru CO'nun N1 ile değişimi

Bazı testlerde motorun yüksek devirde uzun süreli çalıştırılmaması nedeniyle yüksek devirlere ait ölçüm alınmamıştır. Ancak testlerde en düşük ve en yüksek ölçümler ortalamalarda gözlemlendiği gibi ortaya çıkmıştır. Literatürden de görüleceği gibi CO emisyonlarının en düşük ve en yüksek gözlemlendiği motor devirleri sırasıyla maksimum güç ile rölanti devirleridir. Bu sebeple ölçümler esnasında CO konsantrasyonunun en düşük gözleneceği motor fazının maksimum N1 hızındaki faz olması ve motor hızının en yüksek %99 N1 hızında olduğu dikkate alındığında, bu fazdaki CO konsantrasyonunun gözlenen en düşük konsantrasyon olması beklenmekteydi. Ancak bazı testlerde %99'daki CO konsantrasyonları %80-85'deki konsantrasyonlardan daha yüksek olarak ölçülmüştür. Örneğin, Test13 ve Test16'da %99 devirlerinde CO konsantrasyonu %80-85 devirlerinden daha düşüktür. Devir yükseldikçe CO konsantrasyonunun azalması yönündeki eğilimin testlerin çoğunluğunda tutarlı bir biçimde görülmüş olması, bu durumun cihaz ölçümünden kaynaklı bir hata vb. olmadığı yönünde düşünülmektedir. Dahası bu eğilimin diğer motor modellerinde de görülmüş olması ayrıca bu kanaati desteklemektedir. Bu durum ile ilgili olarak ICAO veri tabanı incelendiğinde ICAO emisyon veri tabanında kalkış ve tırmanma fazları için CO emisyon indisleri CFM56-3B2 motorunda eşit ve 0.9 gr/kg yakıt değerindedir (ICAO, 2015). Buna göre bazı motor tiplerinde en düşük CO emisyonları kalkış fazında, yani motorun en yüksek güçte çalıştığı fazda gözlenmiştir. Bunun yanında birçok motor tipi için ise kalkış ve tırmanma fazlarındaki emisyon indislerinin birbirine eşit olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu değerlere göre ilgili motorun yüksek güçteki CO emisyonlarının ya birbirine

eşit olduğu, ya da analizörlerin değerlerinde saptanamayacak ölçüde farklar meydana geldiği düşünülebilir.

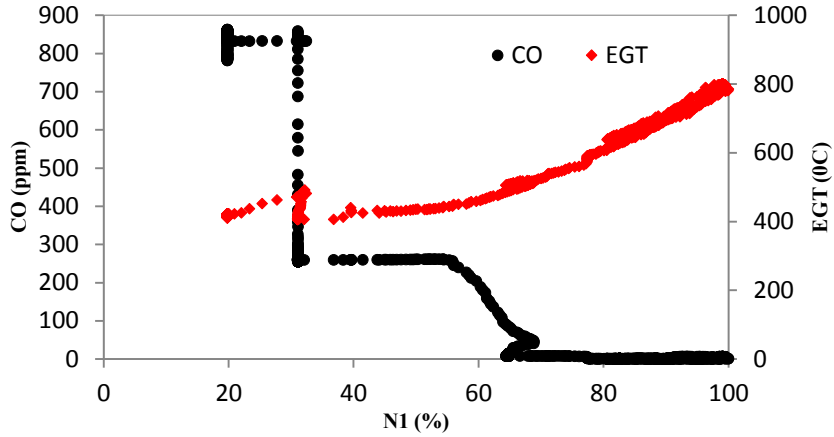
Test sonuçlarına göre CO konsantrasyonlarının soğuk ve sıcak rölantideki değerlerinde belirgin bir fark olabileceği gözlenmiştir (Şekil 5.7.). Bu farkın motorda minimum rölanti veya yaklaşma rölantisine artışı motorda yanma odası sıcaklığının artması neden olarak gösterilebilir. Çünkü test sırasında %99'luk devirlere çıkılmış ve daha sonra düşük devirlere tekrar geçilmiştir. 25 testin tamamında soğuk ve sıcak rölantiler arasında belirgin farklar bulunmuştur. -3B2 motorunda Test01'den Test02'nin soğuk rölantideki CO konsantrasyonu 811.0 ve 850.6 ppm iken sıcak rölantideki konsantrasyonlar sırasıyla 781.9 ve 809.8 ppm şeklinde bulunmuştur. Bu değerler, sıcak rölanti esnasında soğuk rölantiye göre Test01'de %3.5 ve Test02'de %4.8 oranında daha düşük CO konsantrasyonu anlamına gelmektedir. Bu duruma testlerin motorun uzun süredir çalışmasından kaynaklı iç sıcaklığının daha yüksek olmasının yol açtığı söylenebilir. -7B24 motoru Test14'de soğuk rölantideki CO konsantrasyonu 872.5 ppm iken sıcak rölantideki konsantrasyon 637.2 ppm şeklinde bulunmuştur. Bu değerler, sıcak rölanti esnasında soğuk rölantiye göre %29.1 oranında daha düşük CO konsantrasyonu anlamına gelmektedir. Bu oranın bu motor testi özelinde yüksek olmasında motorda yüksek devirlerde 3 kez (%85N1, %90N1 ve %97N1) çalışılması da etkilidir.



Şekil 5.7. Sıcak ve soğuk rölanti CO konsantrasyonu

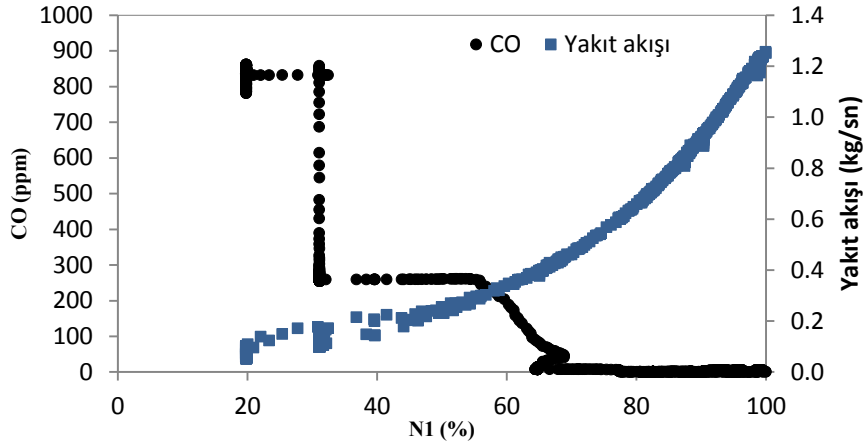
Diğer testlere (Test01'den Test12'ye) ait sıcak ve soğuk çalıştırma rölanti koşullarına bağlı CO emisyonu Ek-5'te yer alan grafikte verilmiştir.

CO konsantrasyonu ile yakından ilişkili motor parametrelerinden biri de EGT'dir. CFM56-7B26 motorunda yapılan, 17. teste ait motor devrine (%N1) bağlı EGT-CO değişimi Şekil 5.8.'de verilmektedir. EGT değerlerine bakılacak olursa hem soğuk hem de sıcak rölanti değerlerinde minimum rölantideki EGT değerlerinin yaklaşma rölantisindeki EGT değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Minimum rölantiden yaklaşma rölantisine geçişte EGT'nin bir miktar azalması dışında, EGT motor devri arttıkça doğrusal olarak artmaktadır denilebilir. Tabii bunun nedeni, EGT'nin artmasının N1 artışının sağlıyor olmasıdır. Bu durum Şekil 5.8.'de açıkça görülmektedir. Test17 özelinde; en düşük motor devrinde (%19.8N1) EGT 419⁰C; motor devri %99.1 ile en yüksek devre ulaştığında EGT, 798⁰C olmuştur. Diğer taraftan EGT arttıkça CO konsantrasyonunun azaldığı bütün testlerde gözlenmiştir.



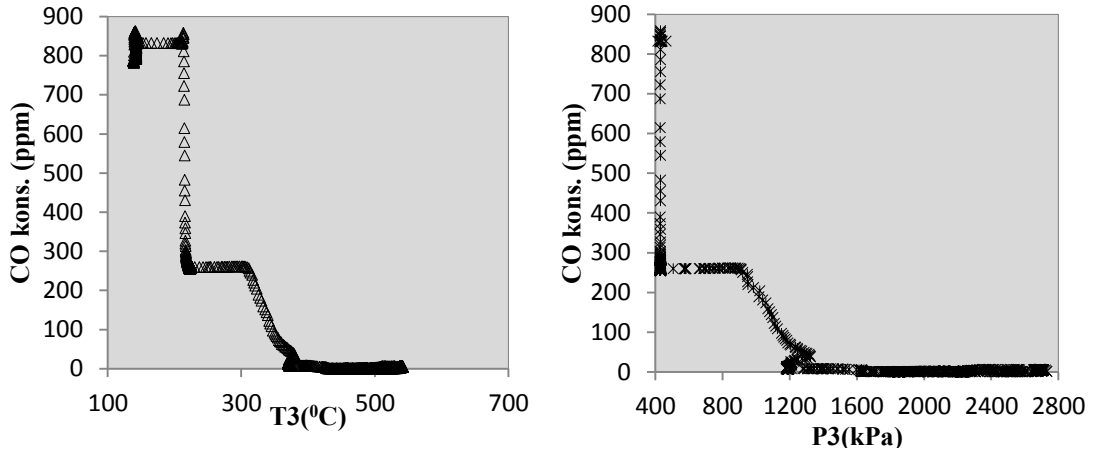
Şekil 5.8. Test17- Motor devri (N1) ile CO konsantrasyonu ve EGT değişimi

Motor verilerinden yakıt akışı ile CO arasında, EGT ile benzer bir sonuç mevcuttur. Yakıt akışı arttıkça CO konsantrasyonu azalmaktadır. Ortalamalar bazında CO'nun yakıt akışı parametresine göre değişimi Şekil 5.9'da verilmiştir. Diğer bütün testlerde de bu durum söz konusudur.



Şekil 5.9. Test17- Motor devri (N1) ile CO konsantrasyonu ve yakıt akışı değişimi

CO konsantrasyonunun motor parametrelerinden, yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi Şekil 5.10.'da gösterilmektedir. Yapılan analizler yanma odası giriş sıcaklığı ve basıncı ile birlikte CO konsantrasyonunda da bir azalış gözlenmiştir.



Şekil 5.10. CO konsantrasyonunun yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi (Test17)

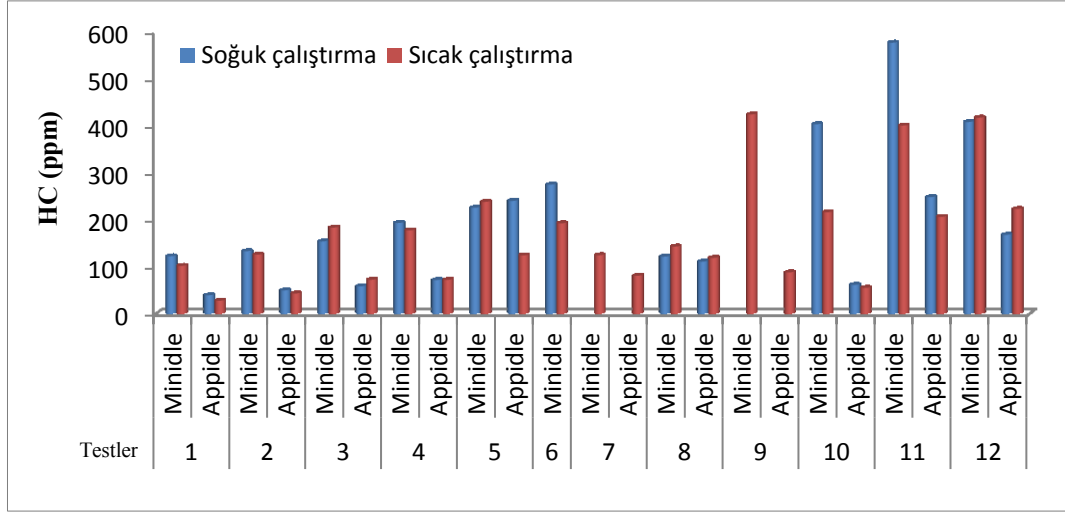
Bütün testler için N1'e bağlı CO değişimi ve bazı testler için egzoz gaz sıcaklığı, yakıt akışı, yanma odası giriş sıcaklığı, yanma odası giriş basıncı ile CO değişimi Ek-2'deki grafiklerde verilmektedir.

5.1.3. THC emisyonları

Çalışmada kullanılan hidrokarbon analizörü üç dakikada bir ölçüm değeri üretmektedir. İlk bir dakika içerisinde örnek gazın alınması, geri kalan iki dakikada ise hidrokarbon konsantrasyonunun belirlenmesi prensibi ile çalışır. Bu sebeple her bir motor fazı için ortalama 2 ile 4 arasında ölçüm alınmıştır. Bazı durumlarda analizörün örnekleme alması motorun hızlandığı veya yavaşladığı anlarda, yani stabil çalışma fazı dışında gerçekleşebilmektedir. Böyle durumlarda ölçülen değerler dikkate alınmamıştır, zira aksi halde kararlı fazlarda elde edilen ortalamaları önemli ölçüde değiştirme riski bulunmaktadır. Sonuç olarak, hidrokarbon ölçümlerinde diğer analizörlerdeki gibi devamlı ve anlık bir veri akışı söz konusu değildir.

En yüksek hidrokarbon konsantrasyonu soğuk minimum rölanti devrinde elde edilmiştir. %80 ve %95 gibi yüksek güçlerde ise bazı testlerde analizör sıfır değerini ölçmüştür. Birden fazla test yapılan motorlarda minimum ve yaklaşma rölanti değerlerinde birinci testten ikinci ve diğer teste doğru tutarlı bir artış gözlenmiştir. Yani her test, bir önceki teste göre daha fazla miktarda HC konsantrasyonu üretmiştir. Bu sonuçtan hareketle aynı test içerisinde soğuk ve sıcak rölanti değerlerinde de benzer bir eğilim beklenmiştir. Ancak bu beklenti tam olarak gözlenmemiştir. Minimum rölanti (Minidle) durumu ele alınacak olduğunda görülmüştür ki, bazı testlerde soğuk minimum rölanti HC konsantrasyonları, sıcak minimum rölanti konsantrasyonlarından daha yüksektir (Şekil 5.11.). Yüksek devirden sonra sıcak çalıştırma durumunda motorun ısınması, HC emisyonlarının düşmesine neden olmuştur.

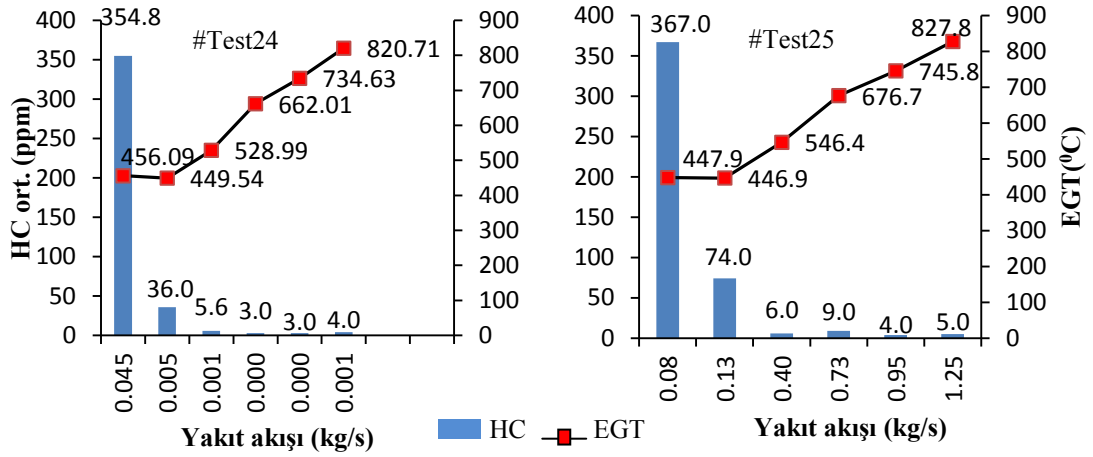
Diğer testlere (Test13'ten Test25'e) ait sıcak ve soğuk çalıştırma minimum rölanti ve yaklaşma rölanti koşullarına bağlı HC emisyonu Ek-5'te yer alan grafikte verilmiştir.



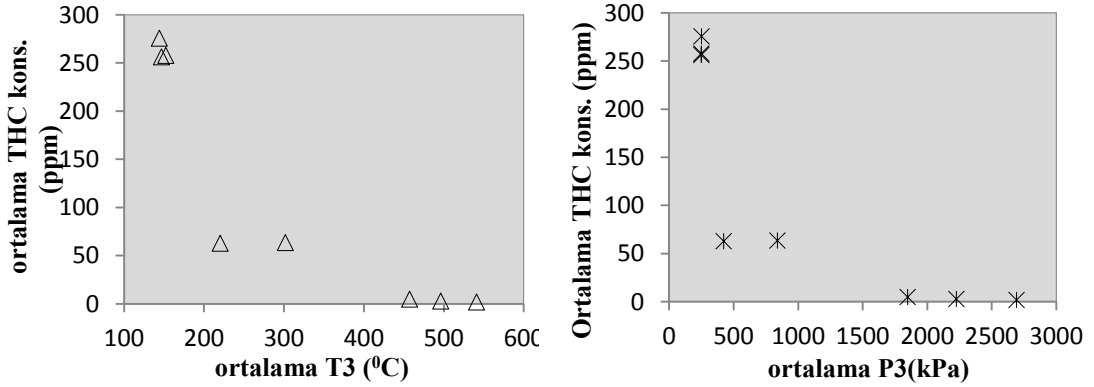
Şekil 5.11. Sıcak ve soğuk rölanti HC konsantrasyonları

Yaklaşma rölantilerine (Appidle) bakıldığında ise ortalama değerlerde soğuk yaklaşma rölantisi HC konsantrasyonu sıcak yaklaşma rölantisi HC konsantrasyonundan az bir miktar daha düşük bulunmuştur. Testlere ayrı ayrı bakıldığında ise daha farklı bir eğilim gözlenmiştir. Yaklaşma rölantisinde sıcak ve soğuk şartlar arasında beklenen farklılıklar minimum rölantiye göre daha düşüktür, çünkü soğuk yaklaşma rölantisi aslında motorun soğuk minimum rölantide çalıştıktan sonraki çalışmasını göstermektedir. Buna rağmen ve ortalamalar anlamında farklılık az olarak bulunsa da, ayrı ayrı testlerde yaklaşma rölantisinde dahi soğuk ve sıcak çalıştırmada farklılıklar gözlenmiştir. Bu farklılıkların, motorun yüksek devirlerde çalıştırılma süresinin artması ile yükseleceği düşünülmektedir.

HC konsantrasyonu ile yakından ilişkili motor parametrelerinden biri de EGT'dir. HC konsantrasyonları ve EGT parametresi motor çalışma fazlarına göre Şekil 5.12.'de gösterilmektedir. EGT değerlerine bakılacak olursa hem soğuk hem de sıcak rölanti değerlerinde minimum rölantideki EGT değerlerinin yaklaşma rölantisindeki EGT değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, yukarıda bahsedilen soğutma havasındaki ve hava yakıt oranındaki değişim ile ilgili yorumu destekler niteliktedir. Yani motor hızı ve yakıt akışı artmasına rağmen EGT düşmektedir.



Şekil 5.12. Ortalama HC konsantrasyonunun ortalama yakıt akışına ve EGT'ye göre değişimi

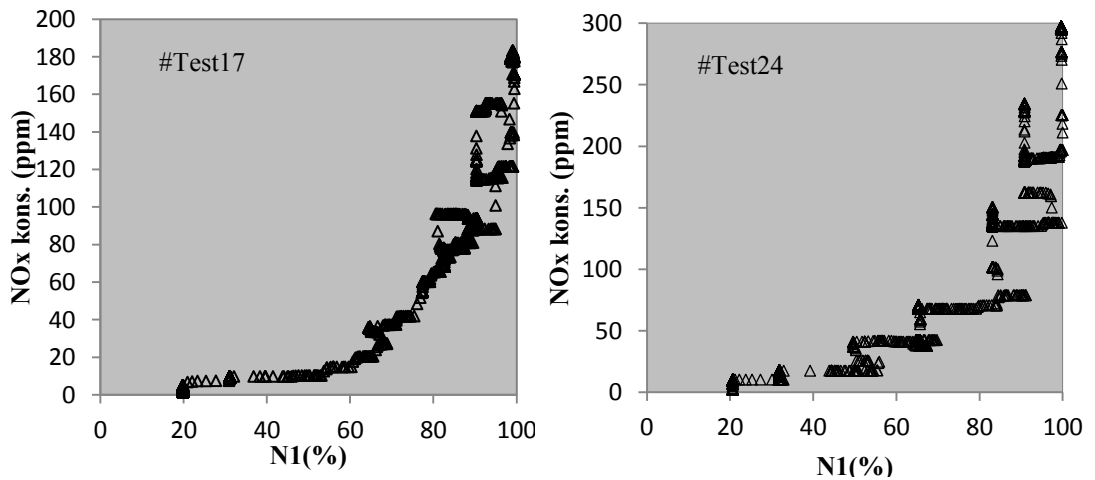


Şekil 5.13. Ortalama THC konsantrasyonunun yanma odası ortalama giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi (Test17)

THC konsantrasyonunun motor parametrelerinden, yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi Şekil 5.13.'de gösterilmektedir. Testlerde THC verileri anlık olmadığı için ortalama yanma odası giriş basıncı ve sıcaklığı verileri ile ortalama THC verileri karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler yanma odası giriş basıncı ve sıcaklığı arttıkça THC konsantrasyonlarının azaldığını göstermiştir.

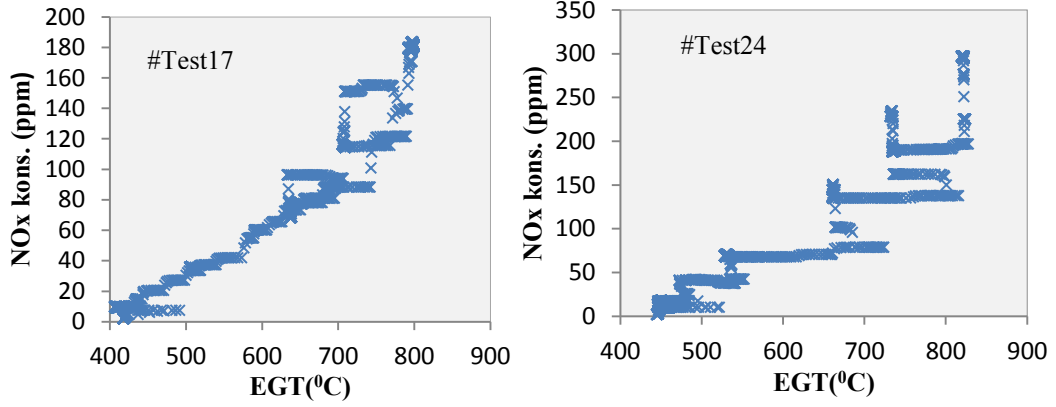
5.1.4. NO_x emisyonları ve motor parametreleriyle ilişkilendirilmesi

Motor parametrelerinden N1 motor devri ile NO_x konsantrasyonu arasında doğrusal bir ilişki olmadığı Şekil 5.14.'te görülmektedir. Buna göre CO'da görülenin tersine burada özellikle yüksek motor devirlerinde NO_x'un N1 ile belirgin bir şekilde artması söz konusudur. Ancak sadece Test10'da 1057 rpm motor devrinde (%20N1) NO_x 8.73 ppm iken, motor devrinin arttığı ve 1639 rpm (%30N1) olduğu motor devrinde NO_x konsantrasyonu 3.14 ppm değerine düşmüştür. Oysaki motor devri arttığında NO_x'un da artması beklenirdi. Bu testte yakıt akışı artmasına rağmen EGT'nin artmaması NO_x'daki bu azalmaya neden olmuş olabilir. Bazı motor testlerinde motor en yüksek devirde çalışırken NO_x konsantrasyonunun 400-500 ppm arasında olduğu gözlenmiştir. Örneğin, -7B26 motorunda 23 Temmuz 2013'de yapılan testte (Test09) en yüksek NO_x konsantrasyonu 446.3 ppm ile %99 motor devrinde ölçülmüştür. Düşük motor devirlerinde NO_x konsantrasyonu devirle birlikte düzenli azalmıştır. Özellikle minimum soğuk idle devrinde en düşük NO_x konsantrasyonları gözlenmiştir. Bu devirde gözlenen en düşük NO_x konsantrasyonu 2 ppm ile yedinci testte 1180 rpm N1 değerinde ölçmüştür. Bazı testlerde (Test18 ve Test20) motor test esnasında yüksek devirlere hızlanmadığından NO_x'un 100 ppm'in altında kaldığı görülmüştür. Yine bazı testlerde (Test07 ve Test09) düşük devirlerde (minimum idle, approach idle) NO_x analizörüne gaz akışı sağlanamadığından NO_x ölçülememiştir.



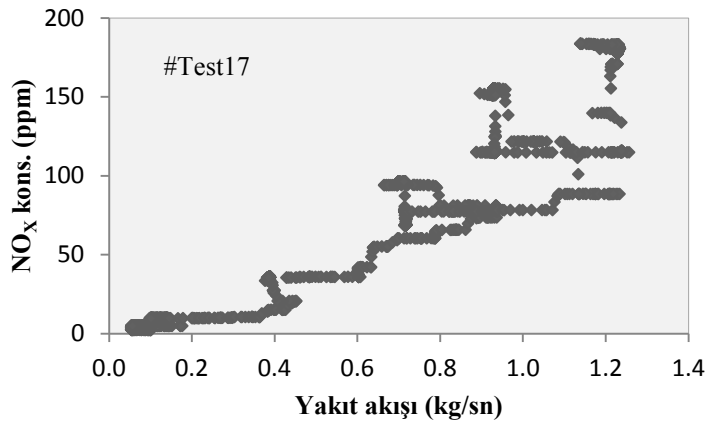
Şekil 5.14. NO_x konsantrasyonu N1 ile değişimi

NO_x ile motor parametrelerinden biri olan EGT arasında Şekil 5.15.'deki gibi bir ilişki söz konusudur. EGT arttıkça NO_x'da artmıştır. Bütün testler incelendiğinde en yüksek EGT değeri CFM56-7B26 motorunda yapılan Test06'da %99 motor devrinde, 840.3⁰C dir. Bu EGT sıcaklığında NO_x konsantrasyonu 460.5 ppm ölçülmüştür.



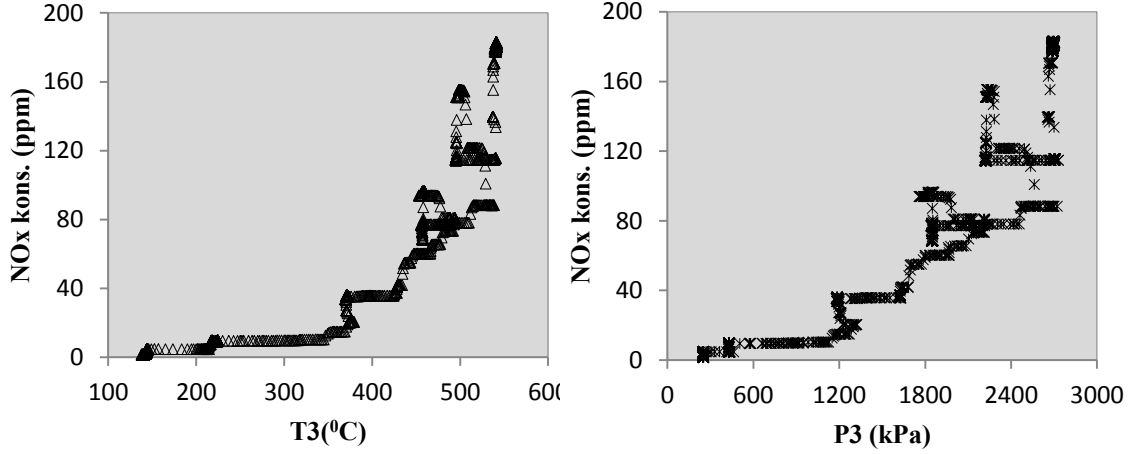
Şekil 5.15. EGT'ye bağlı NO_x değişimi

Yanma odasına giren yakıtın akış hızı arttıkça, NO_x konsantrasyonunun arttığı Şekil 5.16'da görülmektedir. Bu artış 0.4-1.2 kg/sn arasında çok belirgindir. Yanma odasında özellikle devir artışı ile birlikte yakıt akışı arttığı için oluşan NO_x artmaktadır. Yakıt artışı ile birlikte NO_x emisyonu artışı bütün testlerde görülmüştür,



Şekil 5.16. Yakıt akışına bağlı NO_x konsantrasyonu değişimi

NO_x konsantrasyonunun motor parametrelerinden, yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi Şekil 5.17.'de gösterilmektedir. Yapılan analizlerde yanma odası giriş sıcaklığı ve basıncı ile birlikte NO konsantrasyonunda da bir artış gözlenmiştir.



Şekil 5.17. NO_x konsantrasyonunun yanma odası giriş sıcaklık (T3) ve basıncı (P3) ile değişimi (Test17)

Bütün testler için N1'e bağlı NO_x değişimi ve bazı testler için motor parametrelerinden; egzoz gaz sıcaklığı, yakıt akışı, yanma odası giriş sıcaklığı ve yanma odası giriş basıncı motor ile NO_x değişimi Ek-3'deki grafiklerde verilmektedir.

5.2. Emisyon İndisleri

Çalışmada 25 teste ait emisyon ölçüm sonuçları ile ICAO Annex 16'da önerilen (ICAO, 2008) yöntem kullanılarak CO, NO_x ve HC emisyon indisleri hesaplanmıştır. CO₂ için emisyon indisi; CO₂ hava kirletici olarak ele alınmadığı ve ICAO veri tabanında yer almadığı için hesaplanmamıştır. CO₂ değerleri diğer emisyon indislerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. CFM56-7B ve CFM56-3B motorlara ait emisyon indisleri ilerleyen sayfalarda sunulmuştur. Bu motorlarda yapılan testlerin her birine ait emisyon indisleri, ICAO'nun yöntemi ve APEX yöntemi ile hesaplanarak sonuçlar birbirleri ile ve ICAO veri tabanından alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre APEX yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile ICAO yönteminden elde edilen sonuçlar arasında çok fazla farklılık görülmemektedir. ICAO veri tabanında uçuşun 4 fazı (takeoff, climb out,

approach ve idle) için emisyon indisleri verilip, ara devirler için emisyon indisleri geliştirilmemiştir. Bu nedenle ICAO'nun bu fazlara karşılık gelen itki değerleri verilmediği için, tam olarak karşılaştırma yapılamamıştır. Örneğin ICAO'daki kalkış itkisi %100 olarak ele alınmasına rağmen gerçekte test-cell koşullarında yapılan testlerde kalkış itkisi %94-%99 seviyelerinde olmaktadır. Bu durum göstermektedir ki; test-cell de yapılan ölçümler uçuşun farklı devirleri (N1) için emisyon indislerinin geliştirilmesi açısından önemlidir. Minimum rölanti devrinden, ara devirlere ve %99'lara varan itkilerde emisyon indisleri hesaplanabilmiştir.

Test15'de anlık motor verileri temin edilemediğinden bu teste ait emisyon indisleri hesaplanamamıştır.

CO ve NO_x emisyon ölçümleri kuru bazda yapıldığı için, emisyon indisleri de kuru bazda hesaplanabilmiştir. Kuru bazdaki (analizörden önce nem giderimi yapılmıştır) ölçüm sonuçlarının, ıslak bazdaki ölçüm sonuçlarına çevrilememesinin nedeni ise bu düzeltmenin analizörlerden önce sistemde yer alan kurutucudan (perma pure) sonra nem ölçümü yapılmasını gerektirmesidir. Ancak mevcut emisyon ölçüm sisteminde nem ölçümü yapılmamaktadır. Bunun yerine kuru bazda ölçüm sonuçlarını kullanma yoluna gidilmiştir. CO ve NO_x analizöründen önce nemi gidermeyip ıslak ölçüm yapmak ise analizörlerin çalışma şartları ve teknik özellikleri açısından uygun değildir. Ayrıca ICAO HC emisyon ölçümü için ise alev iyonizasyon dedektör analizörünün çalışma sıcaklığı 180⁰C olduğu için bu analizörden önce herhangi bir nem tutucu v.b kullanılmamıştır. Sonuç olarak HC emisyon indisleri ıslak bazda, NO_x ve CO emisyon indisleri kuru bazda yapılan ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir.

Tüm testlere ait ölçüm sonuçları ve emisyon indisleri Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Tüm testlere ait emisyon ölçüm sonuçları ve indisleri

Test no	Faz	N1 (%)	N1 (rpm)	CO ₂ (%)	CO ppm	EICO (g/kg)	EICO (APEX) (g/kg)	NO _x ppm	EI NO _x (g/kg)	EI NO _x (APEX) (g/kg)	HC ppm	EI HC (g/kg)	EI HC (APEX) (g/kg)
Test01	MinC	24.1	1165	2.25	779.3	66.9	69.7	11.8	1.7	1.7	122.3	6.0	6.26
	AppC	33.1	1598	2.38	363.6	30.2	30.7	27.8	3.8	3.9	39.1	1.9	1.86
	%85	84.9	4099	3.98	27.8	1.4	1.4	166.2	13.7	13.8	0	-	-
	%99	99.2	4825	4.88	43.0	1.8	1.8	345.8	23.4	23.4	0	-	-
	AppH	32.3	1558	2.40	362	29.8	30.3	31.4	4.3	4.3	27.5	4.3	1.32
	MinH	23.6	1139	2.56	779	59.1	61.2	21.7	1.5	2.8	101.8	1.5	4.58
Test02	MinC	24.3	1166	2.54	848.1	64.6	67.1	16.0	2.08	2.08	133.1	5.80	6.04
	AppC	32.7	1570	2.46	372.5	29.9	30.5	27.5	3.62	3.69	49.6	2.28	2.32
	%85	85.1	4084	4.03	27.8	1.4	1.4	161.1	13.17	13.21	0	0.00	-
	%99	99.1	4799	4.84	37.8	1.6	1.6	319.4	21.74	21.8	0	0.00	-
	AppH	31.7	1524	2.36	386.3	32.3	32.9	32.3	4.43	4.52	43.0	2.06	2.10
	MinH	23.7	1139	2.52	808.6	62.1	68.9	20.5	2.59	2.69	125.7	5.53	5.75
Test03	MinC	23.5	1157	2.55	847.1	64.2	66.8	18.0	2.24	2.33	153.8	6.68	6.95
	AppC	30.8	1519	2.45	418	33.6	34.31	25.5	3.37	3.44	58.3	2.69	2.74
	%83	82.6	4075	4.03	25.5	1.3	1.28	134.7	11.01	11.04	1.7	0.05	0.05
	%97	97.1	4791	4.82	35.4	1.5	1.48	276.9	18.93	18.98	0	0	0
	%99	99.2	4926	4.99	32.3	1.5	1.54	314.0	20.73	20.79	0	0	0
	AppH	30.0	1481	2.32	436.4	37.0	37.38	23.6	3.28	3.36	72.2	3.50	3.58
Test04	MinH	23.0	1134	2.52	855.5	65.5	68.28	17.5	2.20	2.29	183.3	8.04	8.38
	MinC	23.5	1156	2.57	881.8	66.2	69.0	16.5	2.03	2.12	193.2	8.30	8.66
	AppC	30.8	1515	2.44	439.8	35.5	36.3	23.1	3.06	3.13	71.7	3.31	3.38
	AppH	30.2	1484	2.34	459.4	38.6	39.5	22.2	3.06	3.13	72	3.46	3.54
Test05	MinH	23.0	1133	2.53	874.2	66.6	69.5	16.3	2.04	2.13	177.4	7.74	8.08
	MinC	20.3	1049	1.72	844.8	92.9	95.45	11.4	2.06	2.19	225.5	14.20	15.10
	AppC	31.2	1613	1.84	373.5	39.5	40.82	19.8	3.43	3.55	240.2	14.53	15.04
	%65	64.8	3348	2.58	50.1	3.9	2.81	89.7	11.4	11.49	14.9	0.66	0.67
	%83	82.6	4268	3.49	38.1	2.2	2.20	174.3	16.45	16.50	0	-	-
	%90	90.4	4673	3.92	37.8	1.9	1.94	272.7	22.92	22.98	0	-	-
	%99	98.9	5115	4.42	41.8	1.9	1.90	410.7	30.61	30.07	0	-	-
	AppH	30.5	1580	1.75	404.1	45.8	46.44	17.9	3.33	3.38	124.3	8.06	8.18
MinH	20.2	1049	1.85	766.1	78.9	83.28	11.7	1.98	2.09	238.2	14.05	14.83	

* Çizelgelerde NO_x emisyon indisleri gr NO₂/kg yakıt cinsinden, HC emisyon indisleri THC, analizörde metan edeğeri ile ölçüldüğünden gr CH₄/kg yakıt cinsinden ifade edilmiştir.

Çizelge 5.1. (Devam) Tüm testlere ait emisyon ölçüm sonuçları ve indisleri

Test No	Faz	N1 (%)	N1 (rpm)	CO ₂ (%)	CO ppm	EICO (g/kg)	EICO (APEX) (g/kg)	NOx ppm	EINOx (g/kg)	EINOx (APEX) (g/kg)	HC ppm	EI HC (g/kg)	EI HC (APEX) (g/kg)
Test06	MinC	20.3	1058	1.92	851.5	84.2	89.2	12.2	1.98	2.1	274.7	15.55	16.48
	%99	99.4	5120	4.48	27.8	1.3	1.3	460.5	33.88	34.0	0	-	-
	MinH	20.4	1051	1.78	768.8	82.3	86.9	15.1	2.65	2.8	192.4	11.80	12.45
Test07	MinC	25.1	1180	2.30	695.1		60.78						
	AppC	32.5	1528	2.27	496.9		44.02						
	%87	87.3	4099	3.80	9.6	0.5	0.51	154.0	13.4	13.4	0	-	-
	%99	99.4	4678	4.62	19.4	0.8	0.84	268.0	19.1	19.2	0	-	-
	AppH	31.7	1488	2.26	531.1	45.9	47.26	19.1	2.7	2.8	80.7	4.0	4.1
	MinH	24.7	1159	2.45	787.8	62.3	64.67	16.3	2.1	2.2	124.5	5.6	5.9
Test08	MinC	24.6	1180	2.50	809.5	65.1	69.4	16.0	1.7	2.1	121.5	5.9	5.6
	AppC	31.7	1521	2.30	516.6	45.2	43.9	19.0	2.7	2.7	110.8	5.4	5.5
	%97	97.1	4661	4.64	18.7	0.8	0.8	239	16.9	17.0	0	-	-
	%99	99.4	4768	4.74	13.5	0.6	0.6	273	19.0	19.9	0	-	-
	AppH	31.1	1492	2.26	530.9	47.2	45.9	18	2.6	2.6	118.8	5.8	6.1
	MinH	23.9	1145	2.39	825.7	69.5	66.7	15	2.0	2.1	142.9	6.6	6.9
Test09	MinC	20.2	1040	1.84	1030.8								
	AppC	31.2	1609	1.78	397.2								
	%83	82.7	4260	3.43	26.2	1.5	1.5	88.1	11.2	8.5	4.7	0.16	0.16
	%91	90.6	4664	4.46	31.6	1.4	1.4	304.8	22.5	22.6	0	0.0	0.0
	%99	99.3	5114	4.54	30.6	1.4	1.4	446.3	28.0	32.5	0	0.0	0.0
	AppH	30.7	1580	1.68	391.3	43.6	46.8	8.8	18.0	3.7	87.9	5.63	6.03
	MinH	20.1	1037	1.72	1038.0	113.5	121.4	13.4	2.5	2.6	424.1	26.65	28.4
Test10	MinC	20.3	1057	2.03	860.3	86.0	85.2	8.7	1.5	1.4	403.3	22.83	22.88
	AppC	31.5	1639	2.07	228.5	22.2	22.2	3.1	2.9	0.5	61.4	3.14	3.42
	%63	64.9	3371	2.87	14.4	1.0	1.0	68.3	7.8	7.9	31.4	1.26	1.26
	%83	81.4	4229	3.69	3.2	0.2	0.2	161.5	14.4	14.4	2.7	0.08	0.08
	%91	90.2	4687	4.35	6.1	0.3	0.3	246.8	18.7	18.7	0.0	0.0	0.0
	%99	98.9	5142	5.03	12.9	0.5	0.5	411.9	27.0	27.1	0.0	0.0	0.0
	AppH	31.4	1634	1.92	268.7	27.7	28.2	16.4	2.8	2.8	55.0	3.24	3.30
	MinH	20.2	1052	2.11	730.2	66.7	69.7	11.9	1.8	1.9	215.9	11.29	11.81
Test11	MinC	20.2	1022	1.68	914.4	102.0	109.4	8.5	1.6	1.7	576.9	36.9	36.5
	AppC	30.9	1562	1.76	490.0	54.4	55.8	17.0	3.1	3.2	248.0	15.8	16.2

Çizelge 5.1.(Devam) Tüm testlere ait emisyon ölçüm sonuçları ve indisleri

Test No	Faz	N1 (%)	N1 (rpm)	CO ₂ (%)	CO ppm	EICO (g/kg)	EICO (APEX) (g/kg)	NO _x ppm	EINO _x (g/kg)	EINO _x (APEX) (g/kg)	HC ppm	EI HC (g/kg)	EI HC (APEX) (g/kg)
Test12	MinC	20.2	1022	1.80	910.2	96.3	101.9	6.9	1.2	1.3	408.0	24.7	26.1
	AppC	31.1	1575	1.98	365.7	36.6	37.1	10.9	1.8	1.8	167.9	9.6	9.8
Test13	MinC	20.3	1015	1.83	901.98	93.3	98.93	9.9	1.7	1.79	488.9	28.9	30.7
	AppC	31.5	1567	1.74	492.44	55.4	56.82	15.6	2.9	2.97	236.1	15.2	15.6
	%64	64.6	3273	2.51	76.87	6.2	6.15	72.6	9.5	9.55	37.1	1.7	1.7
	%82	82.4	4169	3.29	14.81	0.9	0.91	143.91	14.4	14.45	13.0	0.5	0.5
	%90	90.2	4568	3.81	14.63	0.8	0.77	238.98	20.7	20.73	10.0	0.3	0.3
	%99	98.8	5001	4.39	19.58	0.9	0.90	354.31	26.6	26.66	6.0	0.2	0.2
	AppH	30.4	1540	1.84	485.95	51.8	53.01	17.58	3.1	3.15	211.1	12.9	13.2
	MinH	20.0	1013	1.70	832.09	93.0	98.61	12.04	2.2	2.34	457.9	29.3	31.1
Test14	MinC	20.7	1016	2.22	872.3	75.5	78.9	11.4	1.6	1.7	392.9	19.5	20.4
	AppC	32.3	1584	2.00	307.1	30.6	30.8	18.5	3.0	3.1	104.1	5.9	6.0
	%67	67.1	3291	2.77	13.5	1.0	1.0	86.5	10.3	10.3	32.0	1.3	1.3
	%85	85.5	4195	3.64	2.9	0.2	0.2	175.1	15.8	15.9	12.0	0.4	0.4
	%94	93.7	4593	4.07	2.7	0.1	0.1	253.8	20.6	20.6	9.0	0.3	0.3
	%97	97.3	4770	4.27	3.8	0.2	0.2	303.4	23.4	23.5	6.3	0.2	0.2
	AppH	31.8	1559	2.06	311.9	31.1	31.3	19.9	3.3	3.3	68.2	3.9	3.9
	MinH	20.9	1023	2.05	637.4	60.9	62.6	14.2	2.2	2.3	198.2	10.8	11.1
Test16	MinC	19.9	1015	2.25	831.0	71.5	74.1	11.3	1.6	1.7	261.8	12.9	13.4
	AppC	31.1	1581	2.15	296.0	27.5	27.6	20.2	3.1	3.1	61.1	3.3	3.3
	%67	64.7	3295	2.68	35.3	2.7	2.6	72.6	8.9	8.9	46.4	2.0	2.0
	%85	82.2	4182	3.62	25.9	1.4	1.4	149.0	13.6	13.6	10.0	0.3	0.3
	%94	90.1	4587	4.01	23.7	1.2	1.2	232.3	19.1	19.1	5.0	0.1	0.1
	%97	99.1	5044	4.49	25.6	1.2	1.1	354.5	26.0	26.1	4.0	0.1	0.1
	AppH	30.8	1567	2.09	277.3	26.6	26.6	24.0	3.8	3.8	42.0	2.3	2.3
	MinH	19.8	1009	2.14	676.5	61.9	63.5	15.3	2.3	2.4	160.1	8.4	8.6

Çizelge 5.1.(Devam) Tüm testlere ait emisyon ölçüm sonuçları ve indisleri

Test No	Faz	N1 (%)	N1 (rpm)	CO ₂ (%)	CO ppm	EICO (g/kg)	EICO (APEX) (g/kg)	NO _x ppm	EINO _x (g/kg)	EI NO _x (APEX) (g/kg)	HC ppm	EI HC (g/kg)	EI HC (APEX) (g/kg)
Test17	MinC	19.8	1010	1.93	836	84.3	87.1	4.0	1.6	1.7	275.8	15.3	16.2
	AppC	31.0	1578	2.02	259.6	25.8	25.9	9.6	4.3	4.3	63.7	3.2	3.6
	%83	82.6	4212	3.45	0.55	0.6	0.6	76.5	7.4	7.2	5.0	0.2	0.2
	%90	90.3	4608	3.98	0.59	0.0	0.0	125.4	10.5	9.5	3.0	0.1	0.1
	%99	99.1	5053	4.52	4.68	0.2	0.2	190.0	13.3	13.4	2.0	0.1	0.1
	AppH	30.6	1562	1.91	259.6	28.3	28.4	9.4	1.6	1.7	63.0	3.6	4.2
	MinH	19.8	1008	1.98	711.9	70.2	72.4	6.5	1.1	1.2	256.5	16.6	14.7
Test18	MinC	19.7	1015	1.88	1012.2	101.6	108.3	5.6	0.9	1.0	647.2	10.7	10.9
	AppC	31.0	2281	1.85	319.1	35.5	34.9	7.9	1.4	1.4	104.2	1.4	1.4
	MinH	19.7	1015	1.94	864.3	85.9	89.8	5.5	0.9	1.0	480.6	5.4	5.7
Test19	MinC	20.0	1013	1.90	1014.3	101.5	102.4	7.5	1.2	1.3	670.0	37.6	38.7
	AppC	31.0	1599	1.92	277.0	28.6	29.2	11.3	1.9	2.0	91.2	5.5	5.6
	%65	65.0	3298	2.80	12.5	0.9	0.9	50.2	6.0	5.9	18.0	0.5	0.8
	%82	82.0	4205	3.58	6.6	0.4	0.3	96.7	8.9	9.6	10.6	0.3	0.6
	%90	90.0	4610	4.07	10.1	0.5	0.3	147.6	12.0	12.1	16.0	0.4	0.3
	%99	99.0	5052	4.69	18.4	0.8	0.8	227.7	16.1	16.7	13.6	0.6	0.4
	AppH	31.0	1576	1.85	278.7	29.9	31.0	11.4	2.0	2.1	90.0	5.6	5.0
MinH	20.0	1012	1.94	802.7	79.4	85.1	9.0	1.5	1.6	410.0	31.9	24.9	
Test20	MinC	19.8	1030	1.88	936.7		100.6	7.7		1.36			
	AppC	30.7	1604	1.73	475.2		55.3	11.6		2.19			
Test21	MinC	20.0	1030	1.82	886.5		96.0	5.4		0.9			
	AppC	65.0	3324	2.48	26.2		2.0	52.1		6.9			
	%82	83.0	4236	3.44	1.5		0.1	115.2		11.2			
	%90	90.0	4635	3.89	1.3		0.1	154.1		13.1			
	%99	99.0	5086	4.58	10.0		0.4	251.6		18.2			
	AppH	31.0	1584	1.64	452.2		55.5	10.3		2.1			
	MinH	20.0	1030	1.87	839.5		90.2	8.5		1.5			
Test22	MinC	29.6	1038	2.03	973.6	91.8	97.2	9.1	1.4	1.5	496.1	27.3	31.1
	AppC	46.2	1619	1.95	281.1	28.5	29.7	15.7	2.6	2.6	79.1	5.4	5.4
Test23	MinC	20.0	1061	2.14	1024.2	89.4	93.9	9.5	1.4	1.5	593.0	31.3	29.1
	AppC	30.0	1637	2.03	247.4	24.1	24.2	18.3	3.0	3.0	61.0	3.2	4.8

Çizelge 5.1.(Devam) Tüm testlere ait emisyon ölçüm sonuçları ve indisleri

Test No	Faz	N1 (%)	N1 (rpm)	CO ₂ (%)	CO ppm	EICO (g/kg)	EICO (APEX) (g/kg)	NO _x ppm	EINO _x (g/kg)	EINO _x (APEX) (g/kg)	HC ppm	EI HC (g/kg)	EI HC (APEX) (g/kg)
Test24	MinC	20.0	1056	2.05	764.2	72.9	73.6	10.1	1.6	1.6	354.8	18.9	19.7
	AppC	31.0	1629	1.99	201.0	20.2	20.0	17.5	2.9	2.9	36.0	2.0	3.6
	%64	64.0	3340	2.69	0	0.0	0.0	68.7	8.5	8.4	5.6	0.2	0.2
	%82	82.0	4255	3.64	0	0.0	0.0	135.5	12.4	12.3	3.0	0.1	0.1
	%90	90.0	4649	4.10	0	0.0	0.0	188.5	15.3	15.3	3.0	0.1	0.1
	%98	98.0	5103	4.79	6.1	0.3	0.2	296.0	20.5	20.6	4.0	0.2	0.1
	AppH	31.0	1603	1.92	190.6	20.1	21.3	17.5	3.0	3.0	27.0	1.6	1.6
	MinH	20.0	1048	2.02	644.3	62.7	63.1	10.7	1.7	1.7	258.0	14.7	15.2
Test25	MinC	20.3	1066	1.92	1012.0	100.4	104.1	8.7	1.4	1.5	367.0	21.3	24.0
	AppH	31.5	1651	1.94	302.7	30.9	29.3	17.7	2.3	2.3	74.0	3.7	4.7
	%64	64.0	3360	2.72	1.6	0.1	0.1	53.9	6.6	6.4	6.0	0.2	0.5
	%81	81.4	4270	3.57	1.3	0.1	0.1	102.7	9.6	9.2	9.0	0.3	0.3
	%89	89.2	4681	4.02	1.3	0.1	0.1	143.4	11.9	11.8	4.0	0.1	0.2
	%98	97.6	5122	4.62	1.4	0.1	0.1	227.0	16.3	16.3	5.0	0.3	0.2
	AppH	30.6	1606	1.82	292.2	32.3	34.1	14.2	2.6	2.5	75.0	4.7	4.5
	MinH	20.1	1056	1.84	790.5	83.3	87.3	8.5	1.5	2.2	276.7	16.6	17.6

Yukarıda yer alan Çizelge 5.1.'den anlaşılacağı üzere; öncelikli olarak CO emisyon indisleri karşılaştırıldığında APEX yöntemi ile hesaplanan CO emisyon indisleri, rölanti ve yaklaşma fazları için Annex 16'da hesaplanan emisyon indislerinden belirgin şekilde farklı bulunmamıştır.

Emisyon ölçümü yapılan motor tipleri için belirli emisyon indisleri elde etmek literatürle doğru bir karşılaştırma yapabilmek açısından önemlidir. Ayrıca, ICAO, testlerini çoğunlukla deniz seviyesi şartlarına göre yaptığından çalışmada yapılan emisyon ölçüm sonuçlarının da deniz seviyesi şartlarına çevrilmesi gerekmektedir. Bu nedenle emisyon ölçüm sonuçlarından hesaplanan emisyon indisleri deniz seviyesi standart koşullarındaki emisyon indislerine düzeltilmiştir. Bu düzeltme için literatürde kullanılan ve dördüncü bölümde anlatılan Boeing Fuel Flow-2 (BFF2) yöntemi kullanılmıştır. -3B2, -3B1 ve -7B24 motor tipi için LTO'nun dört fazı ortalama CO, NO_x ve HC deniz seviyesine göre düzeltilmiş emisyon indisleri alttaki çizelgelerde verilmektedir. Bu motorlar için hesaplanan emisyon indisleri ICAO veri tabanı emisyon indisleri ile karşılaştırılmıştır.

ICAO'nun veri tabanı emisyon indisleri motorun belirli güç değerleri baz alınarak ölçülmüştür. Bu değerler, approach (App-yaklaşma), climb (C/O-tırmanma), takeoff (T/O-kalkış) ve idle (rölanti) olarak ifade edilmektedir. Ancak bu çalışmada yapılan testler esnasında motor stabil çalışma fazlarının güç değerleri, ICAO'nun güç değerleri ile tamamen aynı gerçekleşmemiştir. Bu nedenle motor güç değerlerine göre emisyon indisleri karşılaştırılamamıştır. Ancak, ICAO veri tabanında güç değerlerine karşılık gelen FF (yakıt akışı) değerleri de verildiğinden, FF'e karşılık gelen emisyon indisleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.2. CFM56-3B2 motorunun ortalama emisyon faktörleri ile ICAO değerleri

Faz	FF(kg/s)	EICO(g/kg)	EIHC(g/kg)	EINO _x (g/kg)
MinidleC	0.103(+0.004)	57.3 (±1.17)	5.90(±1.08)	2.5(±0.3)
MinidleH	0.101(+0.003)	55.7 (±4.40)	5.51(±1.40)	2.6(±0.6)
ICAO-idle	0.119	30.1	1.75	4.1
AppidleC	0.131(+0.002)	28.4 (±2.86)	2.24(±0.58)	4.3(±0.4)
AppidleH	0.122(+0.002)	30.3(±4.32)	2.28(±1.00)	4.7(±0.7)
ICAO-App	0.314	3.4	0.073	8.7
N1(%85)	0.634(+0.004)	1.2(±0.04)	0.01(±0.02)	15.4(±1.8)
ICAO-C/O	0.878	0.9	0.047	16.7
N1(%97)	1.026	1.32	0.0	22.9
ICAO-T/O	1.056	0.9	0.036	19.4
N1(%99)	1.123	1.4	0.0	25.8

* Koyu renk yazılar ICAO veri tabanı emisyon indisleri (ICAO, 2015)

Çizelge 5.2.'de CFM56-3B2 motorunun deniz seviyesine düzeltilen emisyon indisleri ICAO veri tabanı emisyon indisleriyle karşılaştırılmıştır. ICAO fazlarının hangi motor devirlerinde gerçekleştiği bilinmediği için fazlar yerine yakıt akışı bağlamında bir karşılaştırma yapılmıştır. Yakıt akışlarına göre, minimum idle yaklaşık olarak ICAO'daki idle fazına denk gelmektedir. ICAO approach yakıt akışı test sırasındaki yakıt akışından fazla, ICAO kalkış yakıt akışı, test sırasındaki %97 motor devri yakıt akışına yakın değerdedir.

Minimum idle CO emisyon indisi, ICAO emisyon indisinden daha yüksek bulunmuştur. ICAO idle emisyon indisi 30.1 g/kg iken testlerden (Test01, Test02, Test03 ve Test04) hesaplanan minimum idle emisyon indisi ortalama 57.3 g/kg'dır. Approach emisyon indisleri de ICAO'dan daha farklı bulunmuştur. Bu

belirgin farklılığın nedeni de ICAO yakıt akışlarının daha yüksek olması ile açıklanabilir. Kalkış ve yüksek devirler için elde edilen emisyon indisleri ICAO'ya yakın değerlerdedir.

THC emisyon indislerinde de CO için elde edilen sonuçlara benzer durum söz konusudur. Minimum idle emisyon indisleri ICAO idle emisyon indislerinden yaklaşık 3.4 kat fazladır. Kalkış fazı ve yüksek devirler için ICAO emisyon indisleri ile yakın değerler bulunmuştur.

NO_x için, hesaplanan emisyon indisleri ICAO emisyon indislerinden daha az değerlerde bulunmuştur. Approach ve minimum idle emisyon indisleri ICAO'daki aynı faz emisyon indislerinden daha az değerde bulunmuştur. ICAO idle emisyon indisi hesaplanan emisyon indisinden neredeyse iki kat fazladır. Yüksek itkilerde ise (%97-99) hesaplanan emisyon indisi ICAO kalkış fazı NO_x emisyon indisinden fazladır. Tırmanma emisyon indisi, burada %85 motor devrini işaret etmektedir, bu devirdeki emisyon indisleri ICAO ile yakın değerde bulunmuştur.

Çizelge 5.3. CFM56-3B1 motorunun ortalama emisyon faktörleri ile ICAO değerleri

Faz	FF(kg/s)	EICO(g/kg)	EIHC(g/kg)	EINO _x (g/kg)
MinidleC	0.106(+0.001)	56.7 (±7.31)	3.0(±2.12)	2.0
MinidleH	0.104(+0.00)	57.5 (±3.73)	5.47(±0.70)	2.5(±0.10)
ICAO-idle	0.114	34.4	2.28	3.9
AppidleC	0.132(+0.00)	38.4(+1.09)	2.77(+1.88)	3.3
AppidleH	0.128(+0.001)	40.9(±0.68)	4.41(+1.26)	3.2(±0.14)
ICAO-App	0.290	3.8	0.08	8.3
N1(%87)	0.653	0.45	1.45	16.4
ICAO-C/O	0.792	0.95	0.05	15.5
N1(%97)	0.945	0.73	0.0	20.8
ICAO-T/O	0.946	0.9	0.04	17.7
N1(%99)	0.979	0.63(±0.16)	0.0	23.3(±0.04)

Çizelge 5.3.'de 3B1 motorunda aynı gün yapılan Test07 ve Test08'in hesaplanan emisyon indislerinin deniz seviyesine düzeltilen değerleri verilmiştir. ICAO fazlarının hangi motor devirlerinde gerçekleştiği bilinmediği için fazlar yerine yakıt akışı bağlamında bir karşılaştırma yapılmıştır. Yakıt akışlarına göre,

Minimum idle ICAO'daki idle fazına denk gelmektedir. ICAO approach yakıt akışı test sırasındaki yakıt akışından fazla, ICAO kalkış yakıt akışı, test sırasındaki %97 motor devri yakıt akışına yakın değerdedir.

Minimum idle CO emisyon indisi, ICAO emisyon indisinden daha yüksek bulunmuştur. Approach emisyon indisleri de ICAO'dan daha yüksek bulunmuştur. Bu belirgin farklılığın nedeni de ICAO yakıt akışının daha yüksek olması ile açıklanabilir. Kalkış ve yüksek devirler için elde edilen emisyon indisleri ICAO'ya yakın değerlerdedir.

THC emisyon indislerinde de CO için elde edilen sonuçlara benzer durum söz konusudur. ICAO approach emisyon indisi 0.08 g/kg iken, hesaplanan emisyon indisi en fazla 4.41 g/kg'dır. Kalkış fazı ve yüksek devirler için ICAO emisyon indisleri ile yakın değerler bulunmuştur.

NO_x için, hesaplanan emisyon indisleri ICAO emisyon indislerinden, sadece %87, %97 ve %99 motor devirleri dışında daha az değerlerde bulunmuştur. Approach ve minimum idle emisyon indisleri ICAO'daki aynı faz emisyon indislerinden daha az değerde bulunmuştur. Yüksek itkilerde ise (%97-99) hesaplanan emisyon indisi ICAO kalkış fazı NO_x emisyon indisinden fazladır. Tırmanma emisyon indisi, burada %87 motor devrini işaret etmektedir, bu devirdeki emisyon indisleri ICAO ile yakın değerde bulunmuştur.

Çizelge 5.4. CFM56-7B24 motorunun ortalama emisyon faktörleri ile ICAO değerleri

Faz	FF(kg/s)	EICO(g/kg)	EIHC(g/kg)	EINO _x (g/kg)
MinidleC	0.08	78.20	20.17	1.60
MinidleH	0.079	62.78	11.18	2.20
ICAO-idle	0.109	22.00	2.40	4.40
AppidleC	0.126	31.71	6.15	3.20
AppidleH	0.119	32.09	4.02	2.96
ICAO-App	0.316	2.20	0.10	10.10
N1(%65)	0.404	1.02	1.39	10.08
N1(%83)	0.744	0.17	0.40	15.52
ICAO-C/O	0.910	0.60	0.10	20.50
N1(%90)	0.968	0.14	0.26	20.17
ICAO-T/O	1.103	0.40	0.10	25.30
N1(%99)	1.089	0.19	0.18	22.88

Çizelge 5.4.'de -7B24 motorunda yapılan Test14 için hesaplanan emisyon indislerinin deniz seviyesine düzeltilmiş değerleri verilmektedir. ICAO idle, approach, climb ve takeoff yakıt akışları test sırasındaki yakıt akışlarından fazladır.

Minimum idle CO emisyon indisi, ICAO emisyon indisinden 3 kat fazla bulunmuştur. Approach emisyon indisleri de ICAO'dan daha yüksek bulunmuştur. Bu belirgin farklılığın nedeni de ICAO yakıt akışının daha yüksek olması ile açıklanabilir. Tırmanma ve yüksek devirler için elde edilen emisyon indisleri ICAO'ya yakın değerlerdedir.

THC emisyon indislerinde de CO için elde edilen sonuçlara benzer durum söz konusudur. Kalkış fazı ve yüksek devirler için ICAO emisyon indisleri ile yakın değerler bulunmuştur.

NO_x için, hesaplanan emisyon indisleri ICAO emisyon indislerinden, bütün fazlarda daha az bulunmuştur. Yüksek itkilerde (%90-99) hesaplanan emisyon indisi ICAO kalkış fazı NO_x emisyon indisinden bir miktar daha düşüktür. Tırmanma emisyon indisi, burada %83 motor devrini işaret etmektedir, bu devirdeki emisyon indisi 15.52 g/kg iken, ICAO'da 20.50 g/kg'dır.

5.3. Gerçek Uçuş Koşullarında Hesaplanan Emisyonlar

Çalışmanın bu bölümünde CFM56-7B24 ve -7B26 motorlu uçaklara ait uzun ve kısa mesafeli ikişer uçuşun toplam NO_x, CO ve HC emisyonları belirlenmiştir. -3B1 ve -3B2 motorlarına ait uçuşların seçilmemesinin nedeni, bu motorların eski motorlar olması ve THY filosunda artık kullanılmıyor olması, ayrıca bu motorlara ait FDR (flight data recorder) kayıtlarının bulunmamasıdır. -7B26 motoru, Boeing 737-800 yolcu uçaklarında, -7B24 ise Boeing737-700 uçaklarında çok sayıda uçuşta kullanılmaktadır.

Uçuş FDR kayıtlarında uçuş sırasında çok fazla sayıda veri kaydı mevcuttur, ancak bu veri kayıtlarından hepsi çalışmada kullanılmamıştır. Çalışmada kullanılan parametre listesi Çizelge 5.5.'de verilmektedir. Belirli irtifadaki dış ortam basıncı kayıtlarda yer almadığı için, irtifa kullanılarak

hesaplanmıştır (Bkz Bölüm 4.4. eşitlik 4.16). Dış ortam nemi ise irtifa NO_x emisyon indisi hesaplaması için gerekmektedir (Bkz Bölüm 4.4. eşitlik 4.12).

Çizelge 5.5. Çalışmada kullanılan FDR parametre listesi

Boeing737/Boeing738	
TIME	Zaman
ALT_STDC	1013 mbar deniz seviyesi standart irtifa (m)
N11	1 nolu motorun N1 devri (%)
MACH	Mach sayısı
SAT	Statik dış hava sıcaklığı ($^{\circ}C$)
FF1	1 no'lu motorun anlık yakıt tüketimi (kg/sa)
HEIGHT	Yükseklik (m)

Çalışmada, CFM56-7B24 motorunda yapılan tek test olan Test14 emisyon ölçüm sonuçları kullanılmıştır. CFM56-7B26 motorunda yapılan Test17 aynı motor için yapılan diğer testlerden daha uzun süreli olduğu için bu test sonuçları kullanılmıştır. Ölçülen gerçek emisyon indisleri ve gerçek uçuş verileri kullanılarak elde edilen emisyon indislerinden belirli irtifadaki ve tüm uçuşun toplam emisyonları bulunmaktadır. Uçuşun her fazındaki emisyonlar ölçülemeyeceğinden yerde yapılan emisyon ölçümleri sonucunda elde edilen emisyon indisleri ile motor parametreleri kullanılarak deniz seviyesi emisyon indisleri elde edilmiştir. Bunun için uçuş esnasındaki yakıt akışı (FF, kg/sn) değerleri deniz seviyesi değerlerine düzeltilmiştir. Yakıt akışı düzeltmesi için kullanılan BFF2 metodu Bölüm 4.4.'te (Bkz. eşitlik 4.9.) açıklanmaktadır. Yakıt düzeltimi denkleminde uçuş esnasındaki atmosfer koşullarının da deniz seviyesi şartlarına göre düzeltilmesi gerekmektedir. Daha sonra hesaplanan emisyon indisleri ile yakıt akışı grafiği çizilerek NO_x için doğrusal denklem elde edilmiştir. Böylelikle grafikten interpolasyon yöntemi ile irtifadaki yakıt akışına karşılık gelen deniz seviyesi NO_x emisyon indisi, irtifa emisyon indisine kalibre edilmiştir (Bkz Bölüm 4.4. eşitlik 4.12.).

CO için de yine BFF2 yöntemi, deniz seviyesi emisyon indislerinin irtifa emisyon indisine kalibre edilmesinde kullanılmıştır (Bkz Bölüm 4.4. eşitlik 4.10). Deniz seviyesi CO emisyon indisi deniz seviyesi yakıt akışı grafiği çizildiğinde

iki ayrı empirik denklem elde edilmiştir. Çünkü yüksek yakıt akışında emisyon indisinin düşük, düşük yakıt akışında emisyon indisinin yüksek olması nedeni ile tek bir denklemle düşük yakıt akışlarına karşılık gelen emisyon indisleri hesaplanamamıştır. Bu nedenle iki denklem de kullanılmıştır. Denklemlerde yakıt akışına karşılık gelen emisyon indisi bu sefer irtifa emisyon indisine kalibre edilmiştir. Her faz için ortalama yakıt akışına karşılık gelen irtifa emisyon indisi interpolasyon yöntemi ile bulunmuştur. HC irtifa emisyon indislerinin belirlenmesinde, CO emisyon indisinin belirlenmesindeki aynı yöntem uygulanmıştır. Deniz seviyesi HC emisyon indisleri eşitlik 4.11.'den hesaplanmıştır (Bkz. Bölüm 4.4.).

Elde edilen irtifa emisyon indisinin o fazdaki toplam yakıt akışı ve geçen süre ile çarpılması sonucu o fazdaki toplam NO_x, CO ve HC emisyonları eşitlik 5.1. ile hesaplanmıştır. Analizlerde ele alınan uçaklarda iki motor olduğu için emisyonlar iki (2) ile çarpılmıştır.

$$\text{Emisyon (kg)} = \text{FF (kg/sn)} \times \text{EI(X)} \text{ (g/kg)} \times \text{fazda geçen süre (sn)} \quad (5.1)$$

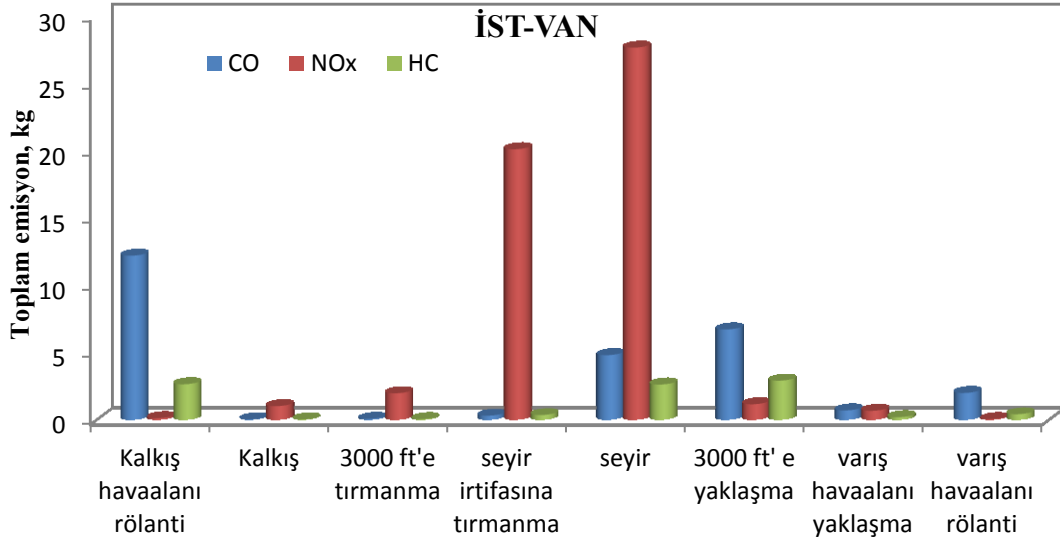
EI(X)= X bileşeni emisyon indisi

CFM56-7B24 motorlu Boeing-737 uçağın İstanbul-Van uzun mesafeli ve İstanbul-Ankara kısa mesafeli iki iç hat uçuşuna ait FDR kayıtları çalışmada kullanılmıştır. -7B26 motoru için ise Boeing-738 uçağının İstanbul-Ankara kısa ve İstanbul-Van uzun mesafeli uçuşuna ait verileri kullanılmıştır. Burada amaç, uzun mesafe uçuşları ve kısa mesafe uçuşlarında emisyon profilini görmek ve yüksekte seyir esnasında toplam emisyonları bulabilmektir.

Bu analizde, LTO fazları olan rölanti, kalkış, 3000 ft'e (914 m) tırmanma, 3000 ft'ten yer seviyesine alçalma ve rölanti ile diğer uçuş fazları olan; 3000 ft'ten (914 m) seyir irtifasına tırmanma, seyir, seyir irtifasından 3000 ft'e alçalma fazları ele alınmıştır. Her fazda toplam CO, NO_x ve HC emisyonları uçağın her bir fazda kalış süresi ile belirlenmiştir.

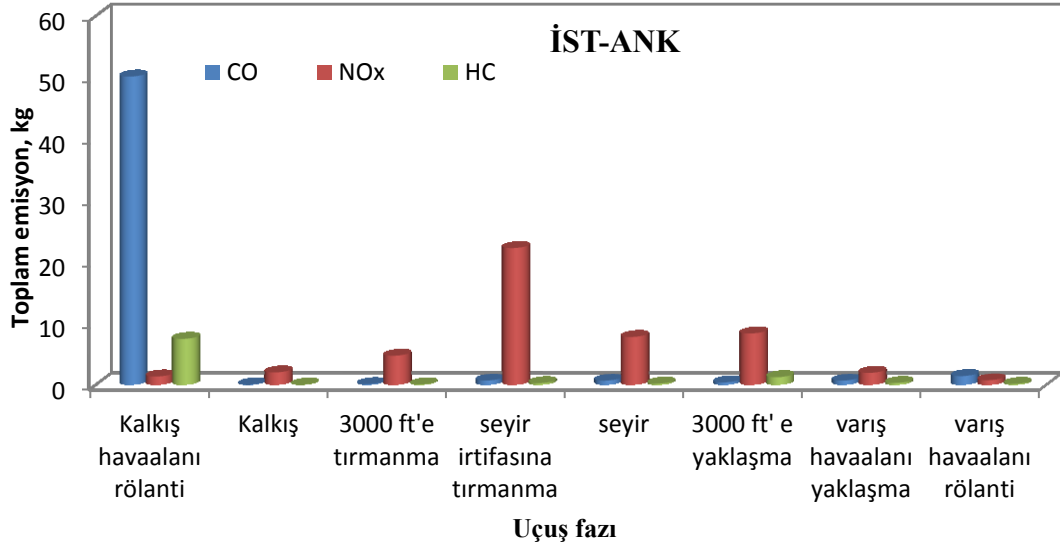
CFM56-7B24 motorlu Boeing737 uçağı İstanbul-Van ve İstanbul-Ankara uçuşları için toplam NO_x, CO ve HC emisyonları fazlara göre Şekil 5.18. ve Şekil 5.19.'da gösterilmektedir. İstanbul-Van arasında uçuş süresi 114 dk'dır. Bu sürenin 20 dakikası LTO'da geçmiştir. LTO dışında geçen süre daha uzundur. LTO toplam NO_x emisyonu 3.8 kg, uçuş toplam NO_x emisyonu ise 52.7 kg'dır.

Toplam uçuş içinde NO_x emisyonlarının %7.13'ü LTO fazlarında oluşmuştur. CO emisyonlarında ise toplam emisyon 27.3 kg iken, LTO toplam emisyon 15.5 kg'dır. Toplam uçuş içinde CO emisyonlarının %56.8'i LTO fazlarında oluşmuştur. Tüm uçuş toplam HC emisyonları 9.2 kg iken, LTO fazları toplam HC emisyonu 3.4 kg'dır. Toplam uçuş içinde HC emisyonlarının %37'si LTO fazlarında oluşmuştur.



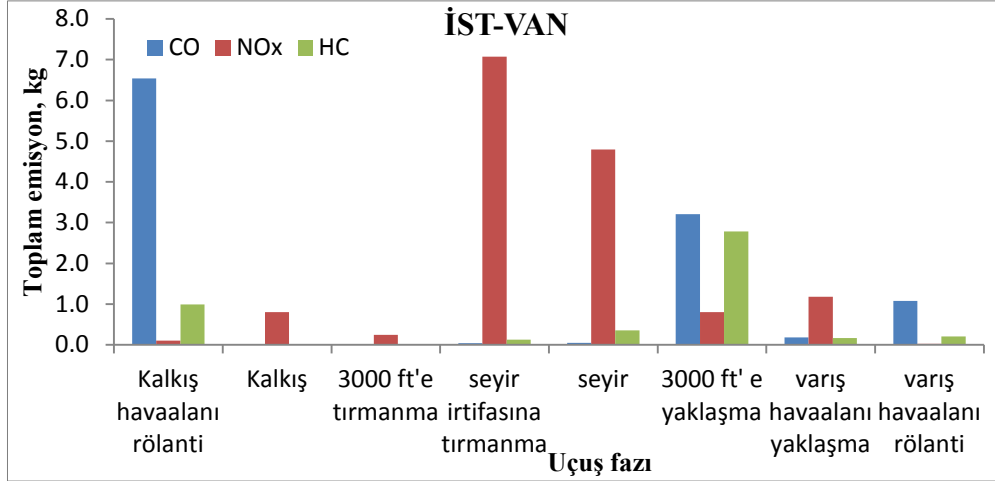
Şekil 5.18. Boeing737 (CFM56-7B24 motorlu) uçağı İstanbul-Van uçuşu toplam emisyonlar

Boeing737 İstanbul-Ankara uçuşu ise yaklaşık 105 dakika sürmüştür. LTO da geçen toplam süre 68 dakikadır ve LTO dışındaki fazlarda geçen süreden %55 daha uzundur. Aslında bu sürenin 58 dakikası kalkış havaalanı rölanti fazında geçmiştir, olağan koşullarda rölanti süresi bu kadar uzun değildir. LTO toplam NO_x emisyonu 10.7 kg, uçuş toplam NO_x emisyonu ise 49.0 kg'dır. Toplam uçuş içinde NO_x emisyonlarının %21.8'i LTO fazlarında oluşmuştur. CO emisyonlarında ise toplam emisyon 58.3 kg iken, LTO toplam emisyon 52.5 kg'dır. Toplam uçuş içinde CO emisyonlarının %90'ı LTO fazlarında oluşmuştur. Tüm uçuş toplam HC emisyonları 9.7 kg iken, LTO fazları toplam HC emisyonu 8.03 kg'dır. Toplam uçuş içinde HC emisyonlarının %82.8'si LTO fazlarında oluşmuştur (Şekil 5.19.).



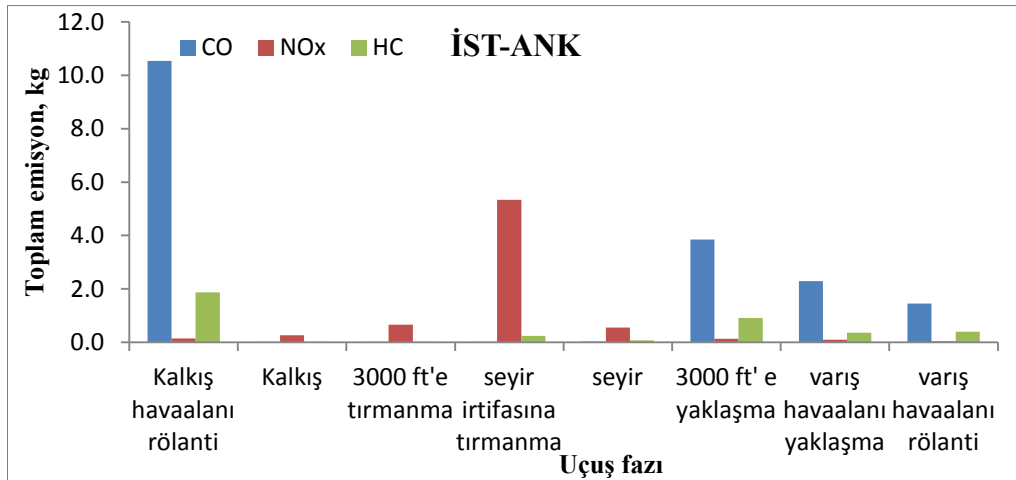
Şekil 5.19. Boeing737 (CFM56-7B24 motorlu) uçağı İstanbul-Ankara uçuşu toplam emisyonlar

CFM56-7B26 motorlu Boeing738 uçağı İstanbul-Van ve İstanbul-Ankara uçuşları için toplam NO_x, CO ve HC emisyonları fazlara göre Şekil 5.19. ve Şekil 5.20.'de gösterilmektedir. İstanbul-Van arasında uçuş süresi 174 dakikadır. Bu sürenin 39 dakikası LTO'da geçmiştir. LTO dışında geçen süre 135 dakika ile LTO uçuş süresinden daha uzundur. LTO toplam NO_x emisyonu 4.7 kg, uçuş toplam NO_x emisyonu ise 30.1 kg dır. Toplam uçuş içinde NO_x emisyonlarının %15.6'sı LTO fazlarında oluşmuştur. CO emisyonlarında ise toplam emisyon 22.2 kg iken, LTO toplam emisyon 15.6 kg'dır. Toplam uçuş içinde CO emisyonlarının %70.3'ü LTO fazlarında oluşmuştur. Tüm uçuş toplam HC emisyonları 9.3 kg iken, LTO fazları toplam HC emisyonu 2.8 kg'dır. Toplam uçuş içinde HC emisyonlarının %30.1'i LTO fazlarında oluşmuştur (Şekil 5.20.).



Şekil 5.20. Boeing738 (CFM56-7B26 motorlu) uçağı İstanbul-Van uçuşu toplam emisyonlar

Boeing738 İstanbul-Ankara uçuşu ise yaklaşık 104 dakika sürmüştür. LTO da geçen toplam süre 37 dakikadır ve LTO'nun 22 dakikası kalkış havaalanı rölanti fazında geçmiştir. LTO toplam NO_x emisyonu 2.4 kg, uçuş toplam NO_x emisyonu ise 14.4 kg'dır. Toplam uçuş içinde NO_x emisyonlarının %16.7'si LTO fazlarında oluşmuştur. CO emisyonlarında ise toplam emisyon 36.3 kg iken, LTO toplam emisyon 28.6 kg'dır. Toplam uçuş içinde CO emisyonlarının %78.8'i LTO fazlarında oluşmuştur. Tüm uçuş toplam HC emisyonları 7.8 kg iken, LTO fazları toplam HC emisyonu 5.3 kg'dır. Toplam uçuş içinde HC emisyonlarının %68'i LTO fazlarında oluşmuştur (Şekil 5.21.) Kalkış havaalanı rölanti süresi seyir fazından daha uzun olduğu için CO emisyonları NO_x emisyonlarından daha fazladır.



Şekil 5.21. Boeing738 (CFM56-7B26 motorlu) uçağı İstanbul-Ankara uçuşu toplam emisyonlar

Havaalanı koşullarına bağılı olarak taksi (burada rölanti) süreleri çok değışken olmaktadır. Taksi süresinin uzun olması nedeni ile, taksi CO emisyonlarının diğer uçuş fazları ile birlikte toplam CO emisyonuna yüzdesel oranı fazladır (Çizelge 5.6.). Bu nedenle taksi dışı fazlardaki emisyonların karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla dört uçuş için hesaplar taksi süreleri için ICAO standart rölanti süreleri alınarak tektar hesaplanmıştır. Yani tüm uçuş için taksi süresi standartlaştırılarak hesaplar tekrarlanmıştır. ICAO standart LTO süreleri içinde kalkış havaalanı rölanti (ICAO'da taxi out) süresi 19 dakika ve varış havaalanı rölanti (ICAO'da taxi in) süresi 7 dakika olmak üzere toplam rölanti süresini 26 dakika olarak almıştır (EASA, 2015). Bu çalışmada kullanılan dört uçuşun FDR kayıtlarında ise rölanti süreleri sırası ile; Boeing737 uçağı uçuşu İstanbul-Van rotasında kalkış havaalanı rölanti 11, varış havaalanı yaklaşık 4 dakika; İstanbul-Ankara rotasında kalkış havaalanı rölantisi 58 dakika, varış havaalanı rölantisi 3 dakika ve Boeing738 uçağı uçuşu İstanbul-Van rotasında kalkış havaalanı rölanti 13, varış havaalanı 4 dakika; İstanbul-Ankara rotasında kalkış havaalanı rölantisi 24 dakika, varış havaalanı rölantisi 7 dakikadır.

Taksi süreleri için ICAO standardı ve gerçek FRD kayıt süreleri kullanıldığı zaman her uçuş fazının toplam uçuş emisyonuna oranının değışimi Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Taksi süresinin standartlaştırılması durumunda uçuş fazları emisyonlarının toplam emisyona oranlarının değişimi (%)

		Boeing 737 (CFM56-7B24 motorlu)						Boeing738 (CFM56-7B26)					
		İST-ANK			İST-VAN			İST-ANK			İST-VAN		
ICAO rölanti süresine göre	Uçuş fazı	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x
		Kalkış havaalanı rölanti	68.0	55.4	1.1	63.7	47.7	0.5	53.6	21.9	0.8	64.3	29.1
	Kalkış	0.1	0.3	4.1	0.0	0.1	1.9	0.0	0.1	1.8	0.0	0.2	5.3
	3000 ft'e tırmanma	0.3	0.8	9.6	0.1	0.3	3.7	0.0	0.3	4.6	0.0	0.1	1.6
	Seyir irtifasına tırmanma	2.2	4.5	45.3	0.6	2.6	38.0	0.1	3.4	37.0	0.2	2.3	46.8
	Seyir	2.2	3.1	15.8	10.4	19.7	52.3	0.1	1.0	3.8	0.3	6.5	31.7
	3000 ft'e yaklaşma	14.4	21.5	17.0	14.6	21.9	2.2	23.5	12.8	0.9	19.5	50.6	5.3
	Variş havaalanı yaklaşma	2.8	4.9	3.9	1.5	1.3	1.2	14.0	5.1	0.7	1.1	3.0	7.8
	Variş havaalanı rölanti	10.1	9.6	3.2	9.0	6.4	0.1	8.7	5.4	0.3	14.6	8.4	0.3
FDR rölanti süresine göre	Kalkış havaalanı rölanti	87.7	79.7	3.2	48.2	31.1	0.2	58.0	48.2	1.9	59.0	21.4	0.7
	Kalkış	0.0	0.2	4.0	0.1	0.2	1.9	0.0	0.2	3.6	0.0	0.2	5.4
	3000 ft'e tırmanma	0.1	0.4	9.6	0.2	0.4	3.7	0.0	0.5	9.2	0.0	0.1	1.6
	Seyir irtifasına tırmanma	1.0	2.3	45.1	1.0	3.6	38.2	0.1	6.3	73.8	0.4	2.7	47.1
	Seyir	1.0	1.6	15.8	17.1	27.7	52.5	0.1	1.9	7.6	0.4	7.7	31.9
	3000 ft'e yaklaşma	6.6	11.0	16.9	23.9	30.8	2.2	21.2	23.5	1.9	28.9	60.0	5.3
	Variş havaalanı yaklaşma	1.3	2.5	3.9	2.4	1.9	1.2	12.6	9.3	1.4	1.6	3.5	7.9
	Variş havaalanı rölanti	2.2	2.3	1.5	7.1	4.3	0.1	8.0	5.1	0.6	20.8	9.6	0.3

*(Değerler ilgili fazın toplam emisyona yüzde katkısını göstermektedir)

6. SONUÇLAR

Test-cell’de yapılan gerçek emisyon ölçüm sonuçları ve sonuçlardan hesaplanan emisyon indisleri kullanılarak elde edilen bulgular doğrultusunda ulaşılan temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Havacılıktan kaynaklanan emisyonlarla ilgili çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların büyük çoğunluğunun havaalanı çevresinde gerçekleşen ve uçakların iniş-kalkış döngüleri (LTO-cycle) olarak tanımlanan uçuş fazları ile sınırlı kalındığı görülmektedir. Bu çalışmada ise sadece LTO fazları için değil, 3000 feet ve üzerinde çoğunlukla uçuşun büyük bir kısmının geçtiği uçuş fazları için de emisyon indisleri belirlenebilmiştir.

Test-cell ortamında ölçüm yapılması, uçakların apronda çalışır halde yapılan (on-wing ölçümler) emisyon testlerine göre avantaj sağlamıştır. On-wing çalışmalarda ölçülemeyen bazı motor parametreleri test-celldede yapılan testler sırasında ölçülmektedir, böylelikle motor parametrelerinin emisyon profiline etkisi ve motor parametreleriyle emisyonlar arasındaki değişimler detaylı olarak incelenebilmiştir.

On-wing ölçümler sırasında motor yüksek itkilerde uzun süre çalıştırılmazken, test-cell ölçümlerinde yüksek itkilerde ve ICAO standart itkileri dışında birçok ara devirlerde emisyonlar ölçülmüştür.

Örnekleme probu literatürde bazı çalışmalarda yapılanın aksine motorun dışarısında değil, motor egzoz lüle kısmı son kademe düşük basınç türbin rotorunun ortasında, basınç probu giriş yuvasına yerleştirilmiştir. Probu bu konumu ölçümler sırasında egzoz gazının bypass havası ile seyrelmeden önce örnekleme yapılabilmesini sağlamıştır. Oysa on-wing çalışmalarda prob, egzoz çıkışının en az 1 m önüne yerleştirilmektedir. Bu durumda da egzoz havasının dış hava ve bypass havası ile seyrelmesine neden olmaktadır. Ölçüm sisteminde, motorun kendi probunun kullanılıyor olması ölçümler sırasında kolaylık sağlamıştır.

NO_x ve CO_2 , N1 motor devri arttıkça artmaktadır. Yanma odası giriş sıcaklığı ve basıncı ile EGT ve yakıt akışı ile birlikte CO_2 ve NO_x konsantrasyonu artış göstermektedir. CO ve HC’de ise NO_x ve CO_2 deki artışın tersine, N1 ve yakıt akışı arttıkça CO ve HC konsantrasyonunda azalma söz konusudur. EGT ve

yanma odası giriş sıcaklığı ve basıncındaki artışla birlikte ise HC ve CO'da azalma gözlenmiştir.

Motorun sıcak ve soğuk çalıştırmaları ise HC ve CO konsantrasyonlarını belirgin bir şekilde etkilemiştir. Sıcak çalışma koşullarında HC ve CO emisyonları soğuk çalıştırmaya göre daha az seviyelerde gözlenmiştir.

CFM56-7B24, -3B1 ve -3B2 motorlarında rölanti, yaklaşma ve tırmanma fazlarındaki NO_x emisyon indisleri ICAO'dan daha düşük bulunmuştur. Ancak kalkış NO_x emisyon indisleri, ICAO kalkış emisyon indisinden daha yüksek bulunmuştur. Bu çalışmada elde edilen rölanti ve yaklaşma CO ve HC emisyon indisleri, ICAO'ya göre daha yüksek bulunmuştur. Bunun nedeni ise, bu çalışmada testi yapılan motorların rölanti devirlerindeki yakıt akışlarının daha düşük olması, motor yaşının fazla olması ve eski motorlar olması ile açıklanabilir.

CFM56-7B24 motorlu Boeing737 ve CFM56-7B26 motorlu Boeing738 uçaklarının gerçek uçuş koşulları emisyonlarının belirlendiği çalışmaya göre: rölanti ve seyirde geçen süreler CO ve NO_x emisyonlarında yakıt akışı ile birlikte belirleyici olmuştur. Boeing738 İstanbul-Van uçuşu toplam NO_x emisyonu (30.1 kg), İstanbul-Ankara uçuşu toplam NO_x emisyonunun (14.2 kg) iki katından daha fazladır. Bu da seyir süresinin İstanbul-Van uçuşunda daha uzun olması ile açıklanabilir. Toplam CO emisyonları için ise uzun ve kısa mesafeli uçuşlar kıyaslandığında, kısa mesafeli İstanbul-Ankara uçuşunda kalkış havaalanı rölanti süresi (58 dakika) İstanbul-Van uçuşuna kıyasla (10 dk) daha fazla olduğu için toplam CO emisyonu 58.3 kg iken İstanbul-Van uçuşunda 27.3 kg'dır. Her iki uçağın uzun ve kısa rota uçuşlarında toplam HC emisyonu en fazla 7-9 kg ile aralığında LTO fazlarında yoğunlaşmıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada, emisyon indisleri belirlenen dört motor tipini kullanan yolcu uçaklarının farklı rotalardaki uçuşları için bütün olarak emisyon etkisini hesaplayabilmek açısından önemli veriler elde edilmiştir. Bundan sonra 3000 feet altı uçuşlar sırasındaki emisyonların yerel hava kalitesine etkileri çalışması ile emisyonların sağlık etkileri, dış hat ve iç hat uçuşları emisyonlarının belirlenmesi çalışmalarının yapılması önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, H., Sawant, A.A., Jansen, K., Miller, J.W. and Cocker, D.R. (2008). "Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines", *Atmospheric Environment*, **42**, 4380-4392.
- Anderson, B.E., Chen, G., Blake, D.R. (2006). "Hydrocarbon emissions from a modern commercial airliner", *Atmospheric Environment*, **40**, 3601-3612.
- Anonim, http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d_462.html
- Bionda, J. (2004), "Investigative Results of NO_x Measurement Bias Due to CO₂ and Moisture Effects", 7. Annual Electric Utilities Environmental Conference, January 19-22.
- Bishop, P.L. (2000), *Pollution Prevention, Fundamentals and Practice*, Waveland Press Inc, Illinois, USA.
- Boubel, R.W., Fox, D.L., Tumer, D.B. ve Stern, A.C. (1994), *Fundenmentals of Air pollution*, Third Edition, Academic Press, San Diego, USA.
- Bowman, C. T. (2000), *Gas-phase reaction mechanisms for nitrogen oxide formation and removal in combustion*, Pollutants from Combustion Formation and Impact on Atmospheric Chemistry, NATO Science Series C: Mathematical and Physical Sciences- Vol. 547, 123-144, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Campbell, N.T., Beres, G.A., Blasko, T.J. ve Groth, R.H., (1982), "Effect of Water and Carbon Dioxide in Chemiluminescent Measurement of Oxides of Nitrogen", *Journal of the Air Pollution Control Association*, **32-5**, 533-535.
- Cheng, M., Corporan, E., Dewitt, M.J., Spicer, C.W., Holdren, M.W., Cowen, K.A., Laskin, A., Harris, D.B., Shores, C., Kagann, R. ve Hashmonay, R. (2008). "Probing emissions of military cargo aircraft: description of a joint field measurement strategic environmental research and development program", *Journal of the Air and Waste Management Assoc.*, **58**, 787-796.
- Cheng, M. ve Corporan, E. (2010), "A study of extractive and remote-sensing sampling and measurements from military aircraft engines", *Atmospheric Environment*, **44**, 4867-4878.

- Cooper, C.D. ve Alley, F.C. (2002), *Air Pollution Control, A Design Approach*, Third Edition, Waveland Press, Inc., Long Grove, Illinois, USA.
- Crane, D. (2002), *Aviation Maintenance Technican Series: Powerplant*, Fifth Edition, Aviation Supplies and Academics Inc., London, England.
- DSÖ- Dünya Sağlık Örgütü (2003), *Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. Report of a WHO Working Group, World Health Organization, Bonn, Germany.
- DuBois, D., Paynter, G. C. (2006), *Fuel flow method 2 for estimating aircraft emissions*, No. 2006-01-1987, SAE International.
- EASA (European Aviation Safety Agency) (2015), *ICAO Aircraft Engine Emissions Databank*, <https://easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- Ekici, S., Yalın, G., Altuntaş, Ö. ve Karakoç, H. (2013), “Calculation of HC, CO and NO_x from civil aviation in Turkey in 2012”, *Int. J. Environment and Pollution*, **53** (3/4), 232-244.
- Elbir, T. (2008), “Estimation of Engine Emissions from Commercial Aircraft at a Midsized Turkish Airport”, *Journal of Environmental Engineering*, **134**, 210-215.
- EPA (1978), *Proposed Revisions to Gaseous Rules for Aircraft and Aircraft Engine*, Federal Register 43, 12615.
- EPA (2012), *Control of Air Pollution from Aircraft and Aircraft Engines, Emission Standarts and Test Procedures, Final Rule*, Federal Register Vol. 77, No: 117, 18 June.
- Fan, W., Sun, Y., Zhu, T. ve Wen, Y. (2012), “Emissions of HC, CO, NO_x, CO₂, and SO₂ from civil aviation in China in 2010”, *Atmospheric Environment*, **52**, 1016.
- Farokhi, S. (2009), *Aircraft Propulsion*, John Wiley & Sans. Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- Flack, R. D. (2005), *Fundamentals of Jet Propulsion with Applications*, Cambridge Aeospace Series, Cambridge University Press, New York USA.

- Flagan, R. C. ve Seinfeld, J. H. (1988), *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
- Folsom, B.A., Courtney, C.W., (1979), “Accuracy of Chemiluminescent Analyzers Measuring Nitric Oxide in Stack Gases”, *Journal of the Air Pollution Control Association*, **29-11**, 1166-1169.
- Garnier, F., Baudoin, C., Woods, P. ve Louisnard, N. (1997), “Engine emission alteration in the near field of an aircraft”, *Atmospheric Environment*, **31(12)**, 1767-1781.
- Grote, M., Williams, I. ve Preston, J. (2014), “Direct carbon dioxide emissions from civil aircraft”, *Atmospheric Environment*, **25**, 214-224.
- Heland, J. ve Fer, K. S. (1998), “Determination of Major Combustion Products in Aircraft Exhausts by FTIR Emission Spectroscopy”, *Atmospheric Environment*, **32(18)**, 3067–3072.
- Herndon, S. C., Rogers, T., Dunlea, E. J., Jayne, J. T., Miake-Lye, R., Knighton, B. (2006). “Hydrocarbon emissions from in-use commercial aircraft during airport operations”, *Environmental Science & Technology*, **40(14)**, 4406-4413.
- Heywood, J.B. (1988), *Internal Combustion Engine Fundamental*, Mc Graw-Hill Book Comp., New York, USA.
- ICAO (2008), “*International Standards and Recommended Practices Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Vol II, Aircraft Engine Emissions*”, Third Edition, Quebec, Kanada.
- ICAO (2013a), *Environmental Protection*. Erişim tarihi: Şubat 2013, <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>
- ICAO (2013b), ICAO Environmental Report 2013 Aviation and Climate Change,
- ICAO (2015), Local Air Quality, Erişim tarihi: Ekim 2015, <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/local-air-quality.aspx>
- IPCC (1999), *Aviation and the Global Atmosphere, A Special Report of IPCC Working Groups I and II in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer* [Penner, J.E., Lister, D.M., Griggs, D.J., Dokken, D.J., McFarland,

- M.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Johnson, G. R., Mazaheri, M., Ristovski, Z. D., Morawska, L. (2008), “A plume capture technique for the remote characterization of aircraft engine emissions”, *Environmental Science & Technology*, **42(13)**, 4850-4856.
- Karakoç, H. ve Turgut, E. T. (2008), *Gaz Türbinli Motor Sistemleri*, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları-No. 1837, Eskişehir.
- Karpuzcu, M. (1994), *Çevre kirlenmesi ve kontrolü*, Kubbealtı Akademisi Kültür ve Sanat Vakfı, Dördüncü Baskı, İstanbul.
- Kerrebrock, J.K. (1992), *Aircraft Engines and Gas Turbines*, Seconda Edition, The MIT Press, London, England.
- Kesgin, U. (2006), “Aircraft emissions at Turkish airports”, *Energy*, **31**, 372-384.
- Klapmeyer, M.E. ve Marr, L.C. (2012), “CO₂, NO_x, and Particle emissions from aircraft and support activities at a regional airport”, *Environmental Science and Technology*, **46**, 10974-10981.
- Lee, H. (2012), *Study on impacts of aviation emissions and related dynamics and chemistry*, Doktora Tezi, Atmospheric Sciences of Graduate Collage of the University of Illinois, Illinois, USA.
- Lobo, P., Hagen, D.E. ve Whitefield, P.D. (2012), “Measurement and analysis of aircraft engine PM emissions downwind of an active runway at the Oakland International Airport”, *Atmospheric Environment*, **61**, 114-123.
- Lyon, T. F., Dodds, W. J., Bahr, D. W. (1980), *Determination of pollutant emissions characteristics of General Electric CF6-6 and CF6-50 model engines*, Cincinnati, Ohio, General Electric Company.
- Matthew, R. (2004), *Simulation of Isothermal Combustion in Gas Turbines*, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.
- Matthews, R.D., Sawyer, R.F. ve Schefer, R.W., (1977), “Interferences in Chemiluminescent Measurement of NO and NO₂ Emissions from Combustion Systems”, *Environmental Science and Technology*, **11**, 1092-1095.

- Mattingly, J. D., Heiser, W. H. and Pratt, D. T. (2002), *Aircraft Engine Design*, Second Edition, AIAA Education Series, Reston, Vermont, USA.
- Mazahari, M., Johnson, G.R. ve Morawska, L. (2011), “An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport”, *Atmospheric Environment*, **45**, 3500-3507.
- Mendez, C. J., Parthasarathy, R. N., Gollahalli, S.R. (2014), “Performance and emission characteristics of butanol/Jet A blends in a gas turbine engine”, *Applied Energy*, **118**, 135-140.
- Morgan W. K. C., Reger, R. B., ve Tucker, D. M. (1997), “Health effect of diesel emissions”, *The Annals of Occupational Hygiene*, **41(6)**, 643-658.
- Müezzinoğlu, A. (2000), *Hava kirliliğinin ve kontrolünün esasları*, Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, İzmir.
- Nevers, N. (2000), *Air Pollution Control Engineering*, Second Edition, Mc Graw Hill, International Editions, Boston, USA.
- Nikoleris, T., Gupta, G, Kistler, M, (2011), “Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at Dallas/Fort Worth International Airport”, *Transportation Research Part D*, **16**, 302–308.
- Presto, A.A, Nguyen, N.T., Ranjan, M., Reeder, A.J., Lipsky, E.M., Hennigan, C.J., Miracolo, M.A., Riemer, D.D. ve Robinson, A.L. (2011), “Fine particle and organic vapor emissions from staged tests of an in-use aircraft engine”, *Atmospheric Environment*, **45**, 3603-3612.
- Oates, G.C. (1989), *Aircraft Propulsion Systems Technology and Design*, AIAA Education Series Inc., Reston, Virginia, USA.
- Renyu, F. ve Man, Z. (2011), “Low Emission Commercial Aircraft Engine Combustor Development in China: From Airworthiness Requirements to Combustor Design”, The 2nd International Symposium on Aircraft Airworthiness (ISAA 2011), *Procedia Engineering* **17**, 618 – 626.
- Rigas, M. L., Ben-Jebria, A., and Ultman, J. S. (1997), “Longitudinal distribution of ozone absorption in the lung: Effects of nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and ozone exposures”, *Archive of Environmental Health*, **52**, 173-178.

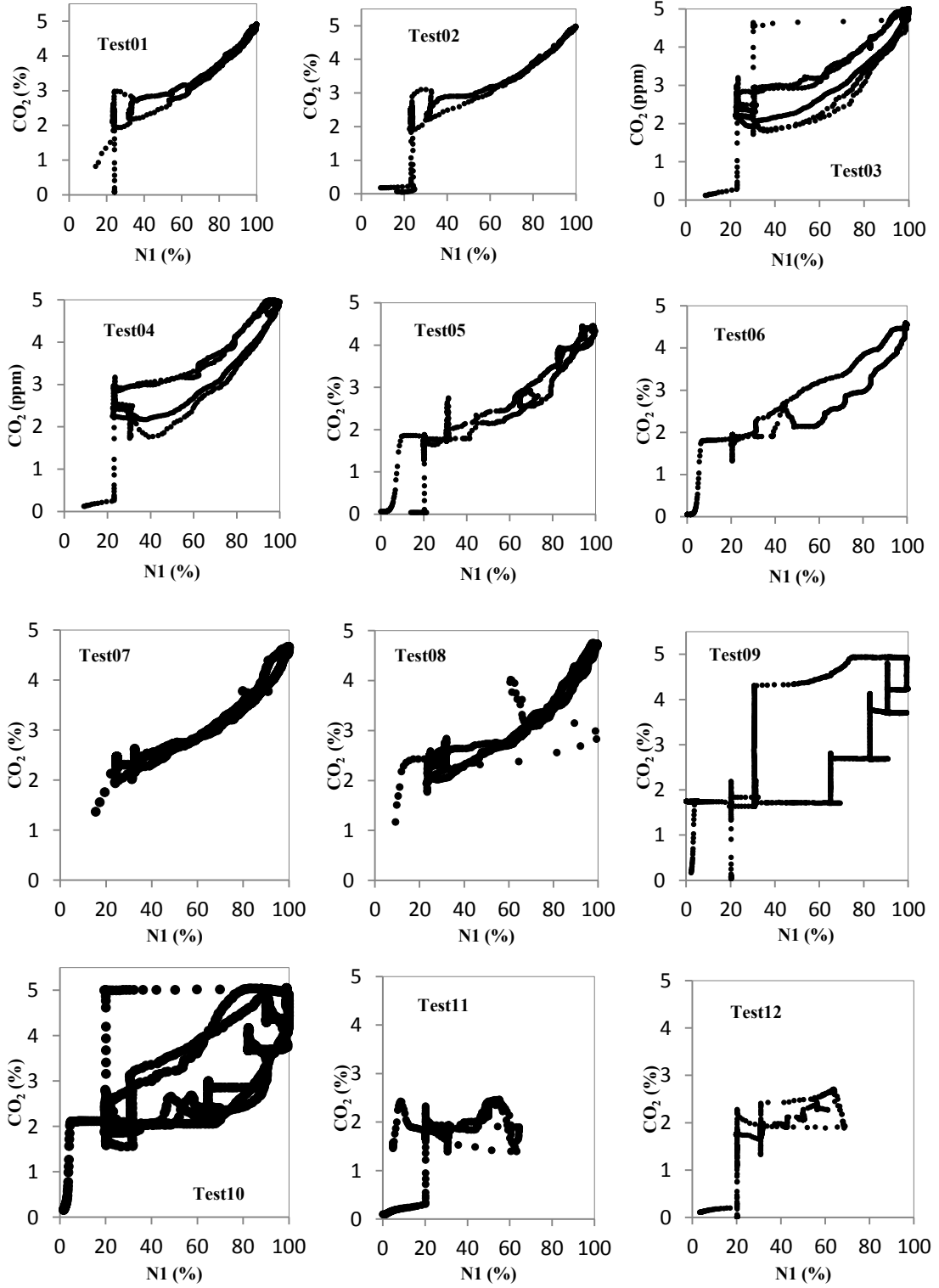
- Rissman, J., Arunachalam, S., Bendor, T., West, J.J. (2013), "Equity and health impacts of aircraft emissions at the Hartsfield- Jackson Atlanta International Airport", *Landscape and Urban Planning*, **120**, 234-247.
- Sayed, A. F. (2008), *Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Schafer, K., Jahn, C., Sturm, P., Lechner, B. ve Bacher, M. (2003). "Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports", *Atmospheric Environment*, **37**, 5261-5271.
- Schulte, P., Schlager, H., Ziereis, H., Schuman, U., Boughcum, S.L., ve Deidevig, F. (1997), "NO_x emission indices of subsonic long-range jet aircraft at cruise altitude: In situ measurements and predictions", *Journal of Geophysical Research*, **102(17)**, 21,431-21,442.
- Song, S. ve Shon, Z. (2012), "Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea", *Atmospheric Environment*, **61**, 148-158.
- Spicer, C. W., Holdren, M. W., Lyon, T. F., ve Riggan, R. M. (1984), *Composition and Photochemical Reactivity of Turbine Engine Exhaust*, Engineering and Services Laboratory, Air Force Engineering and Services Center, Tyndall Air Force Base, Florida, ESL-TR-84-28.
- Spicer, C. W., Holdren, M. W., Cowen, K. A., Joseph, D. W., Satola, J., Goodwin, B., Mayfield, H., Laskin, A., Alexander, M. L., Ortega, J. V., Newburn, M., Kagann, R. ve Hashmonay, R. (2009), "Rapid measurement of emissions from military aircraft turbine engines by downstream extractive sampling of aircraft on the ground: Results for C-130 and F-15 aircraft", *Atmospheric Environment*, **43**, 2612-2622.
- Stern, A.C. (1976), *Air Pollution*, Volume II., The Effects of Air Pollution, Academic Press Inc., New York, USA.
- Teledyne Advanced Pollution Instrumentation (2010). "Compliance of Teledyne API Mid- and High-Range E and T Model Instruments to the Interference Requirements of 40 CFR 60, Method 7E"

- Thomas, G.J. (2013), *Estimation of aircraft emissions for the Corpus Christi International Airport, Corpus Christi, Texas*, Yüksek Lisans Tezi, University of North Texas, Texas, USA.
- Tidona, R.J., Nizami, A.A. ve Cernansky, N.P., (1988), "Reducing Interference Effects in the Chemiluminescent Measurement of Nitric Oxides from Combustion Systems", *Journal of the Air Pollution Control Association*, **38**, 806-811.
- Timko, M. T., Herndon , S. C., Wood, E. C., Onasch, T. B., Northway, M.J., Jayne, J. T., Canagaratna, M. R., Miake-Lye, R. C., ve Knighton, W. B. (2010), "Gas Turbine Engine Emissions – Part I: Volatile Organic Compounds and Nitrogen Oxides", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **132(6)**.
- Tsilingiridis, G. (2009), "Aircraft air pollutant emissions in Greek Airports", *Global NEST Journal*, **11(4)**, 528-534.
- Turgut, E. T., Cavcar, M., Yay, O. D., Ucarsu, M., Yilmaz, E., Usanmaz, O., Armutlu, K., Dogeroglu, T., ve Miake-Lye, R. C. (2014), "Test cell emission measurements of newly-overhauled CFM56-3B2 aircraft turbofan engine", Proceedings of AJCPP, 2014 Asian Joint Conference on Propulsion and Power, 8th March, 2014, Jeju, South Korea.
- Uday, P. (2011), *Mitigating environmental impacts using aircraft operations: A systematic overview and a focus on end-around taxiways*, Yüksek Lisans Tezi, Master of Science in Engineering, Faculty of Purdue University, Indiana, USA.
- Vallero, D. (2008), *Fundamentals of Air Pollution*, Fourth Edition, Elsevier Inc., Boston, USA.
- Van der Mark, T.W., Kort, E., Meijer, R.J., Postma, D.S. ve Koéter, G.H., (1997), "Water Vapour and Carbon dioxide Decrease Nitric oxide Readings", *European Respiratory Journal*, **10**, 2120-2123.
- Wark, K., Warner C.F. ve Davis W.T. (1998), *Air pollution : its origin and control*, 3.baskı, Addison-Wesley, Menlo Park, California, USA.
- Wild, T. ve Sterkenburg, R. (2008), *Aircraft Turbine Engines*, Avotek Information Resource, Weyers Cave, Virginia, USA.

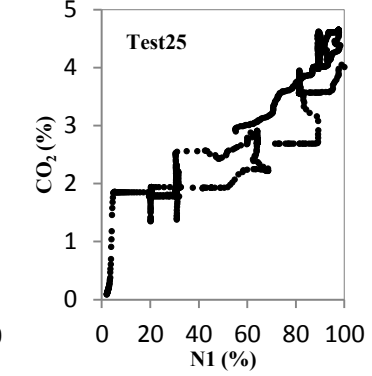
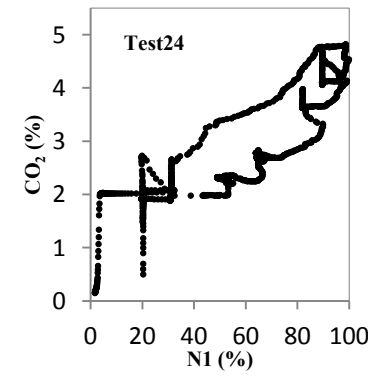
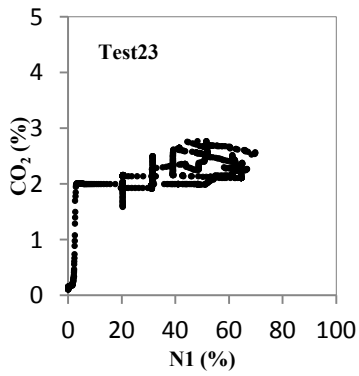
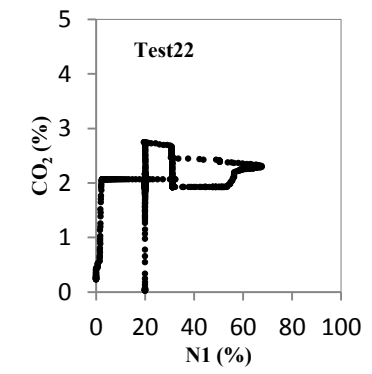
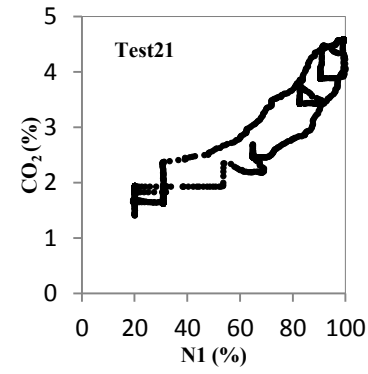
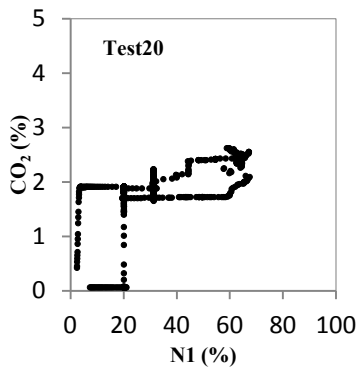
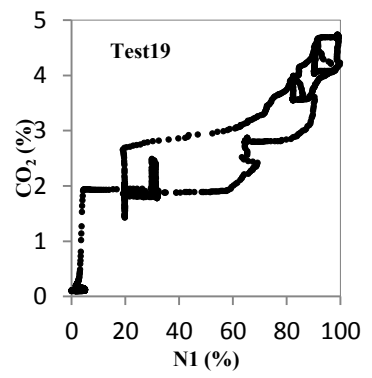
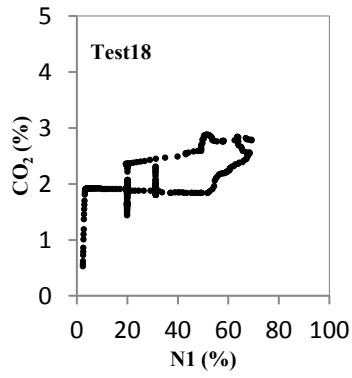
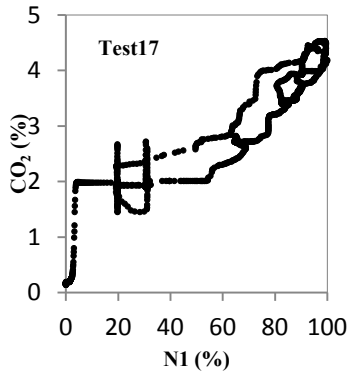
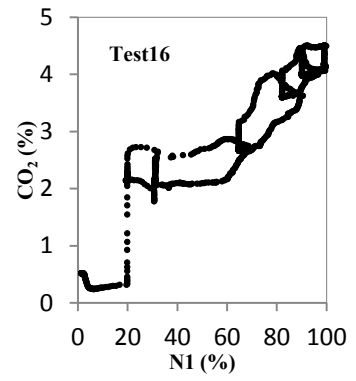
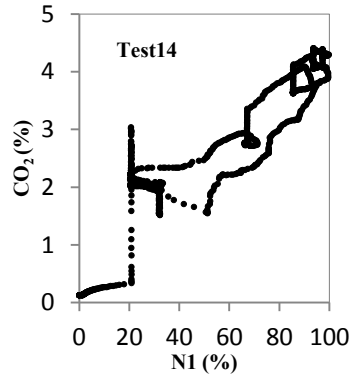
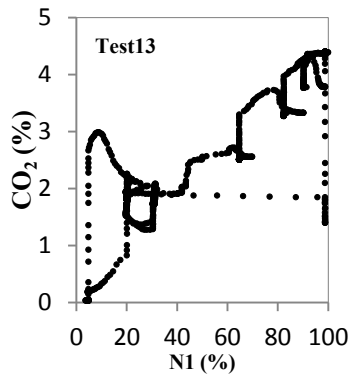
- Yılmaz, İ. ve İlbaş, M. (2012), “Gaz türbinli uçak motorlarında kirletici emisyonların incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **27(2)**, 343-351.
- Yim, S. H.L., Stettler, M. E.J., ve Barrett, S.R.H. (2013), “Air quality and public health impacts of UK airports. Part II: Impacts and policy assesment”, *Atmospheric Environment*, **67**, 184-192.
- Yu, K.N., Cheung, Y.P., Cheung, T.T., Henry, R.C. (2004), ” Identifying the impact of large urban air parts on local air quality by nonparametric regression”, *Atmospheric Environment*, **38**, 4501-4507.
- Zabielski, M.F., Seery, D.J. ve Dodge, L.G., (1984), “Influence of Mass Transport and Quenching on Nitric Oxide Chemiluminescent Analysis”, *Environmental Science and Technology*, **18**, 88-92.
- Zafiriou, O.C., ve True, M.B., (1986), “Interferences in Environmental Analysis of NO by NO plus O₃ Detectors: A Rapid Screening Technique”, *Environmental Science and Technology*, **20**, 594-596.
- Zhu, Y., Fanning, E., Yu, R.C., Zheng, Q. ve Fraires, J.R. (2011), “ Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large international airport”, *Atmospheric Environment*, **45**, 6526-6533.

EKLER

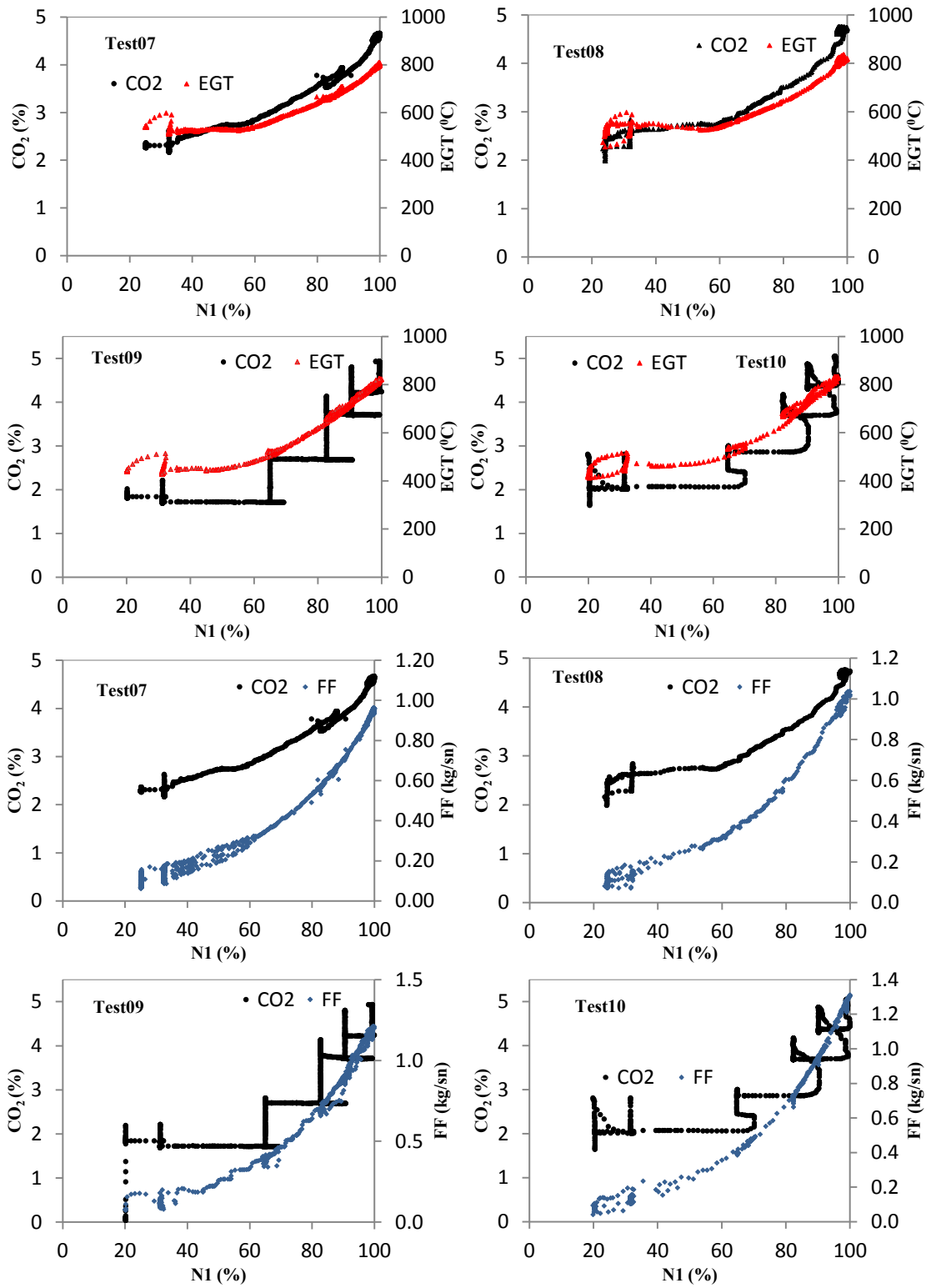
Ek-1 Motor parametreleri ve CO₂ konsantrasyonu



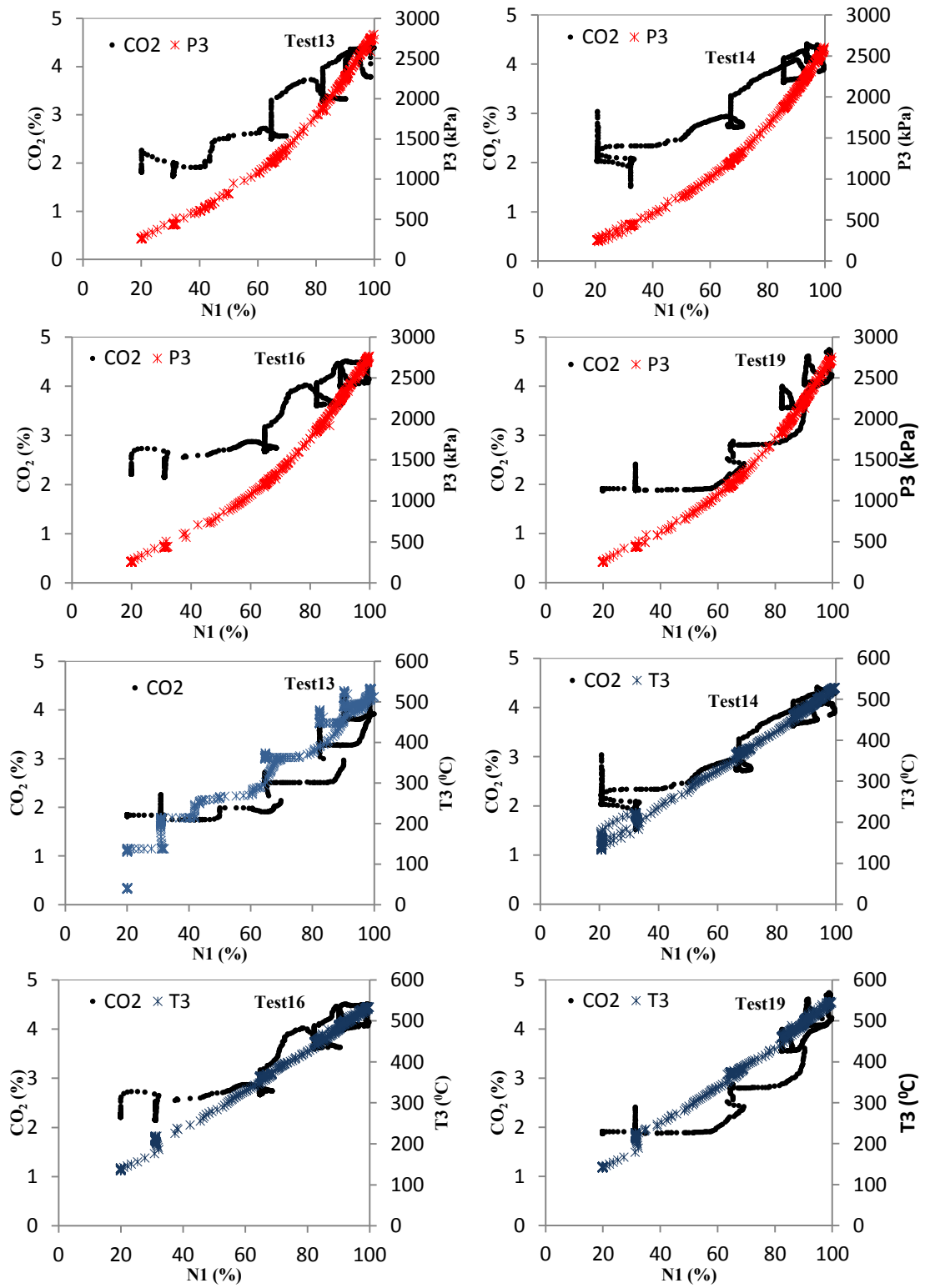
Ek-1 (Devam) Motor parametreleri ve CO₂ konsantrasyonu



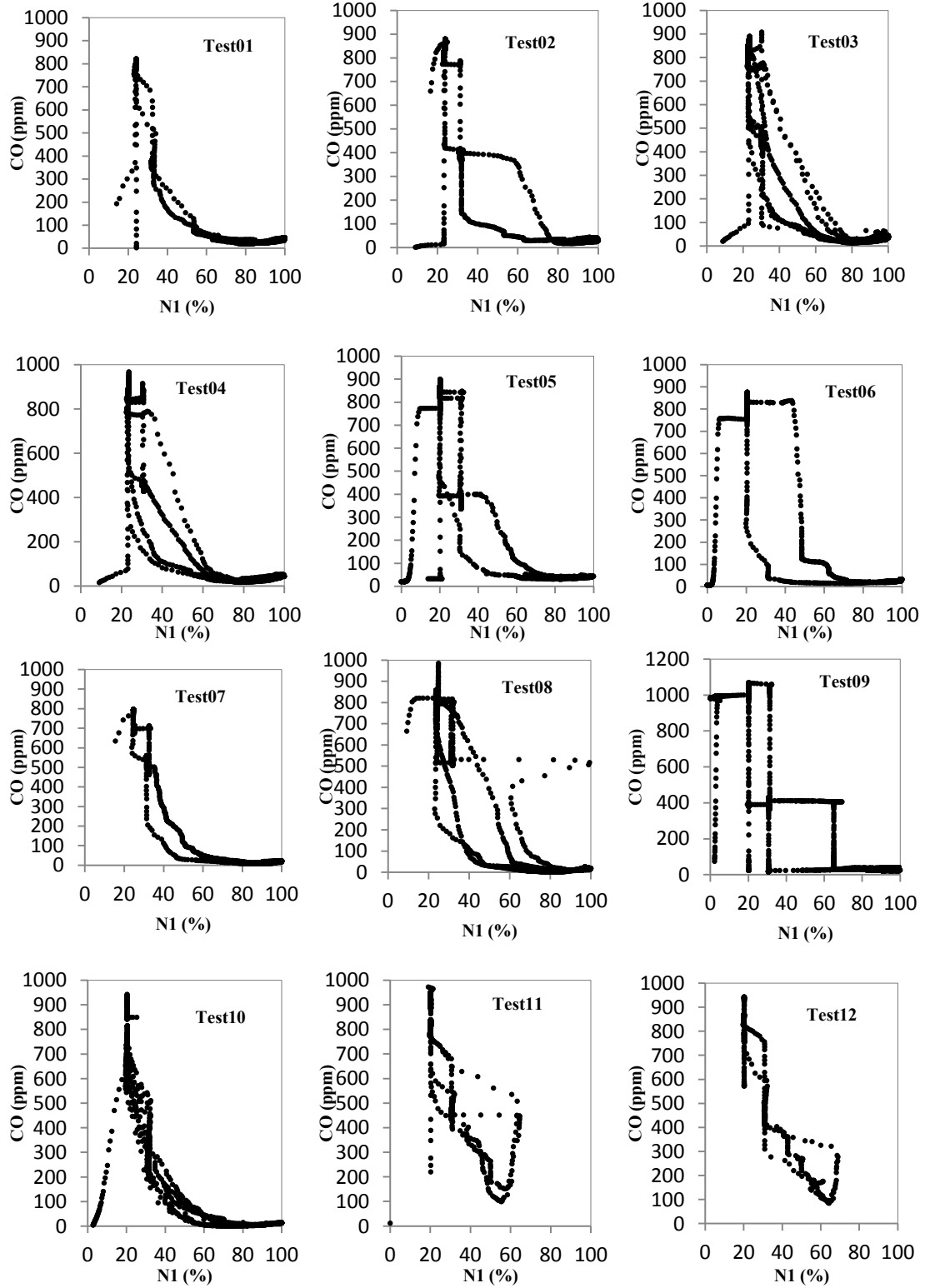
Ek-1 (Devam) Motor parametreleri ve CO₂ konsantrasyonu



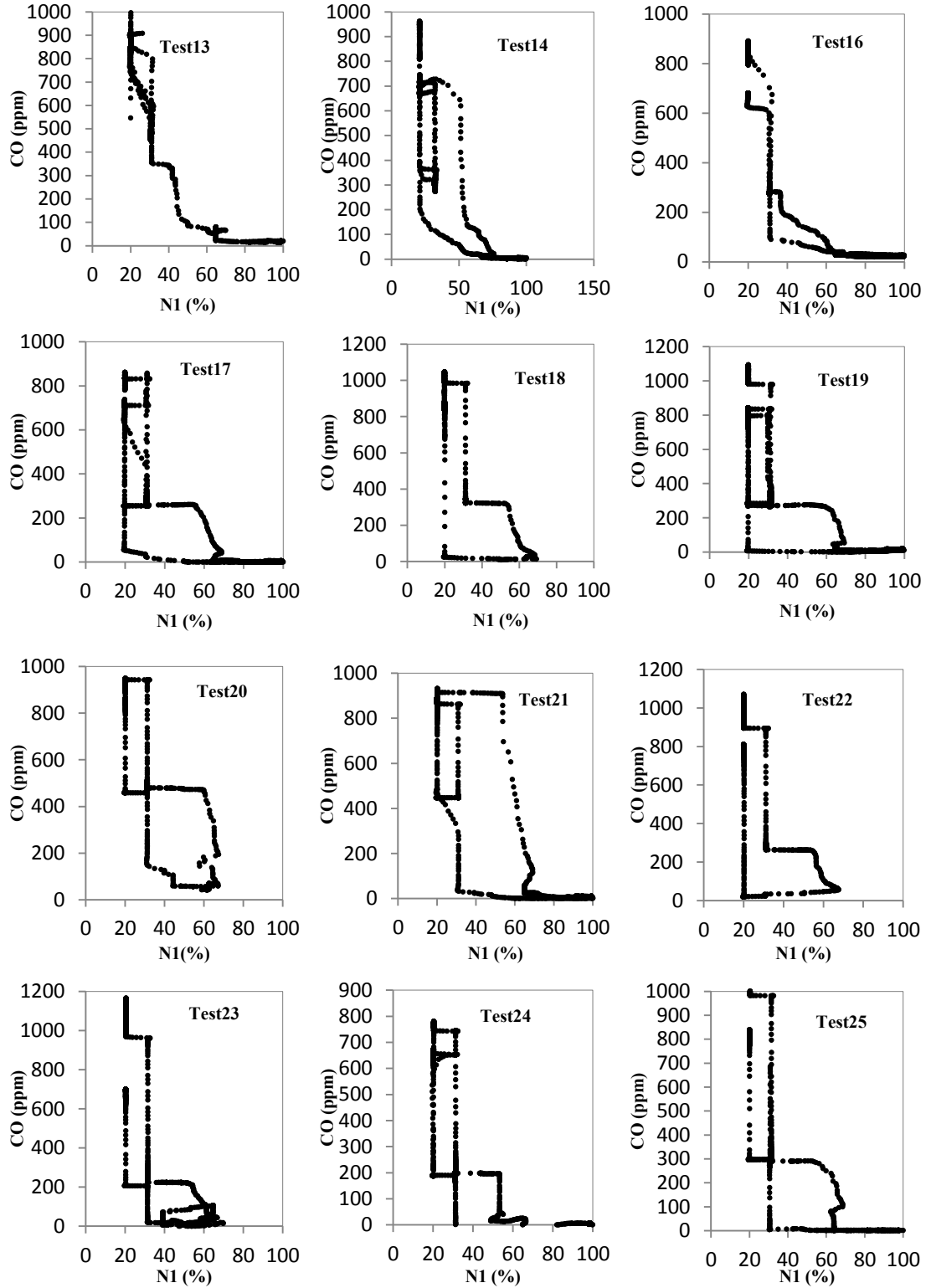
Ek-1 (Devam) Motor parametreleri ve CO₂ konsantrasyonu



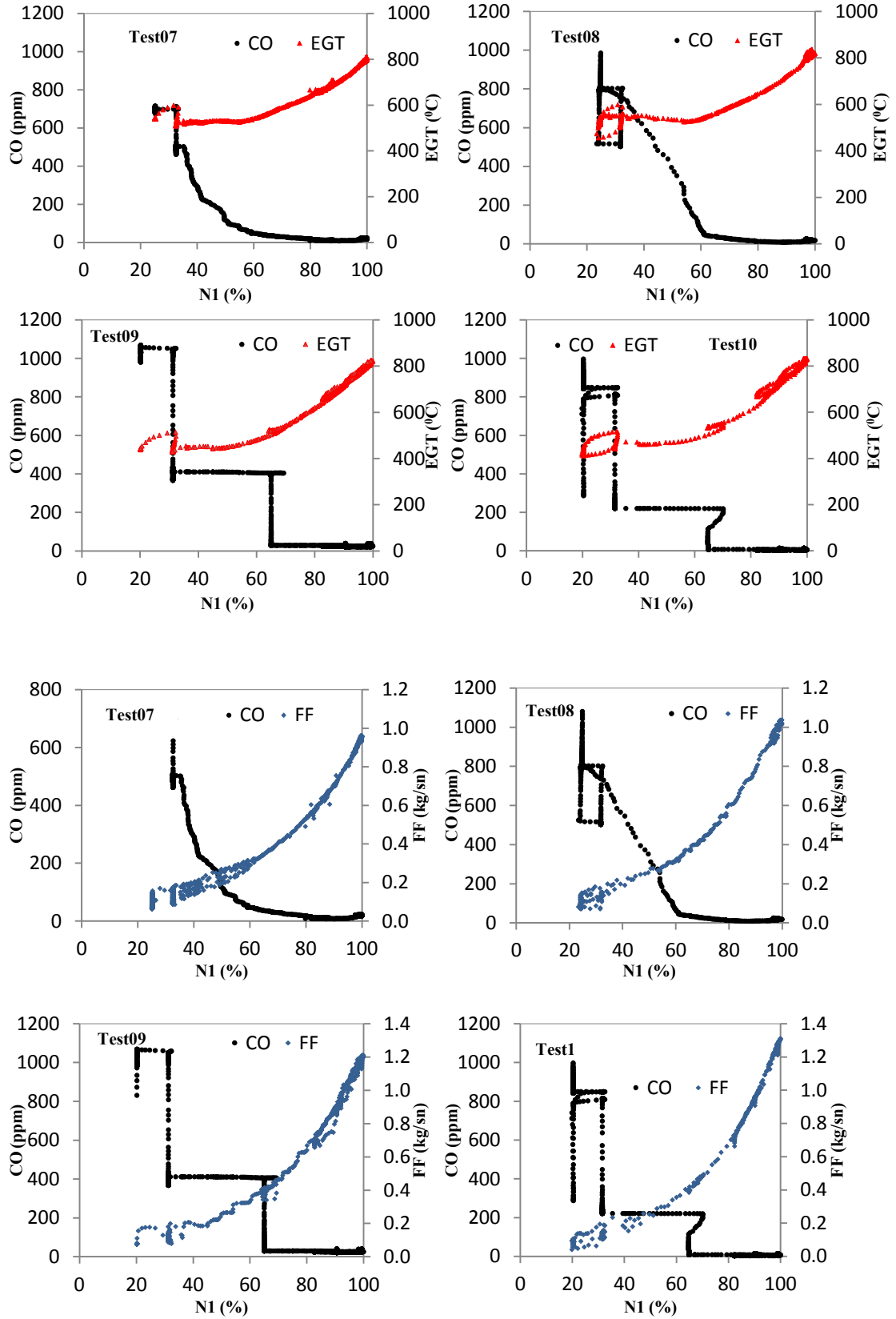
Ek-2 Motor parametreleri ve CO konsantrasyonu



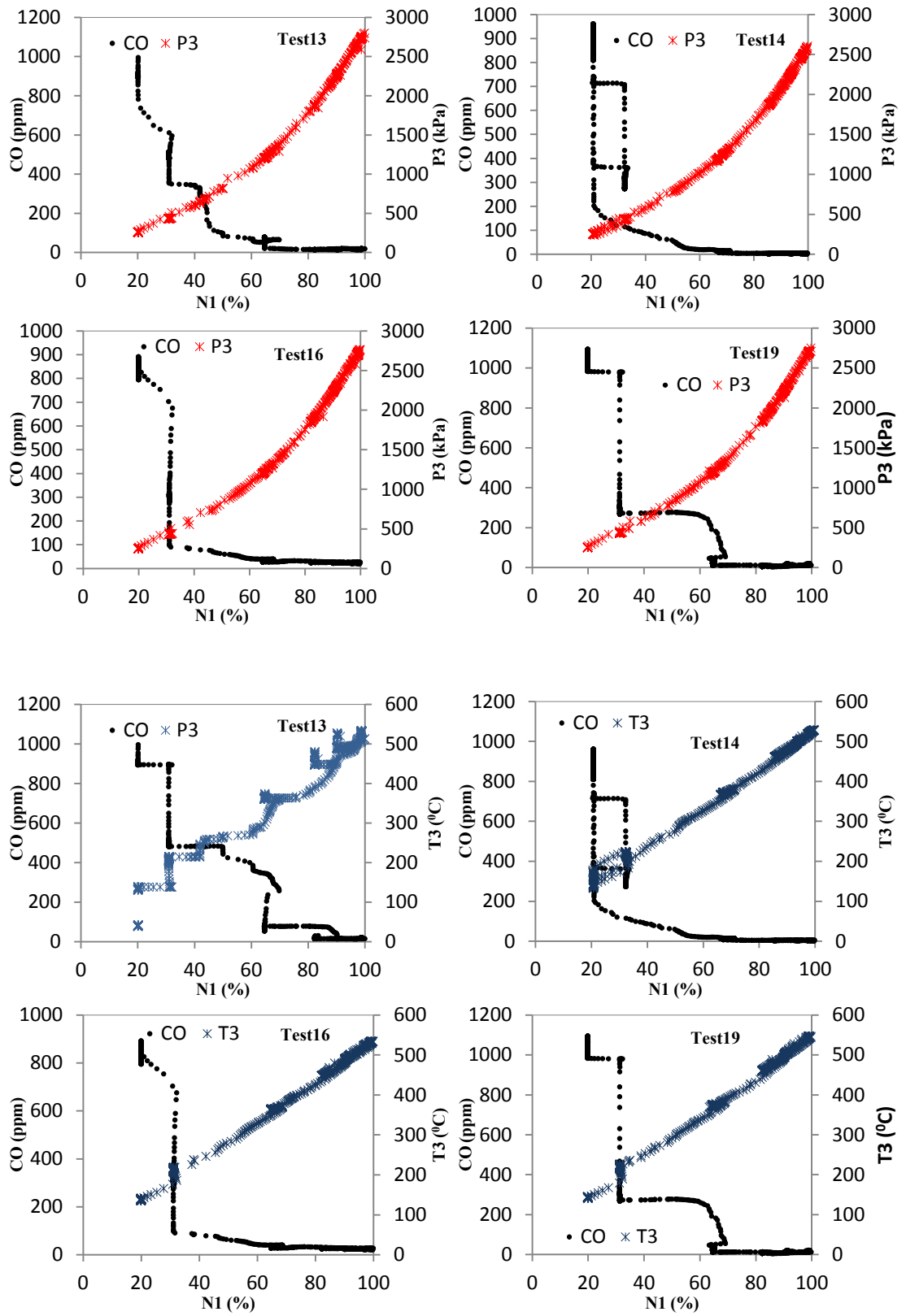
Ek-2 (Devam) Motor parametreleri ve CO konsantrasyonu



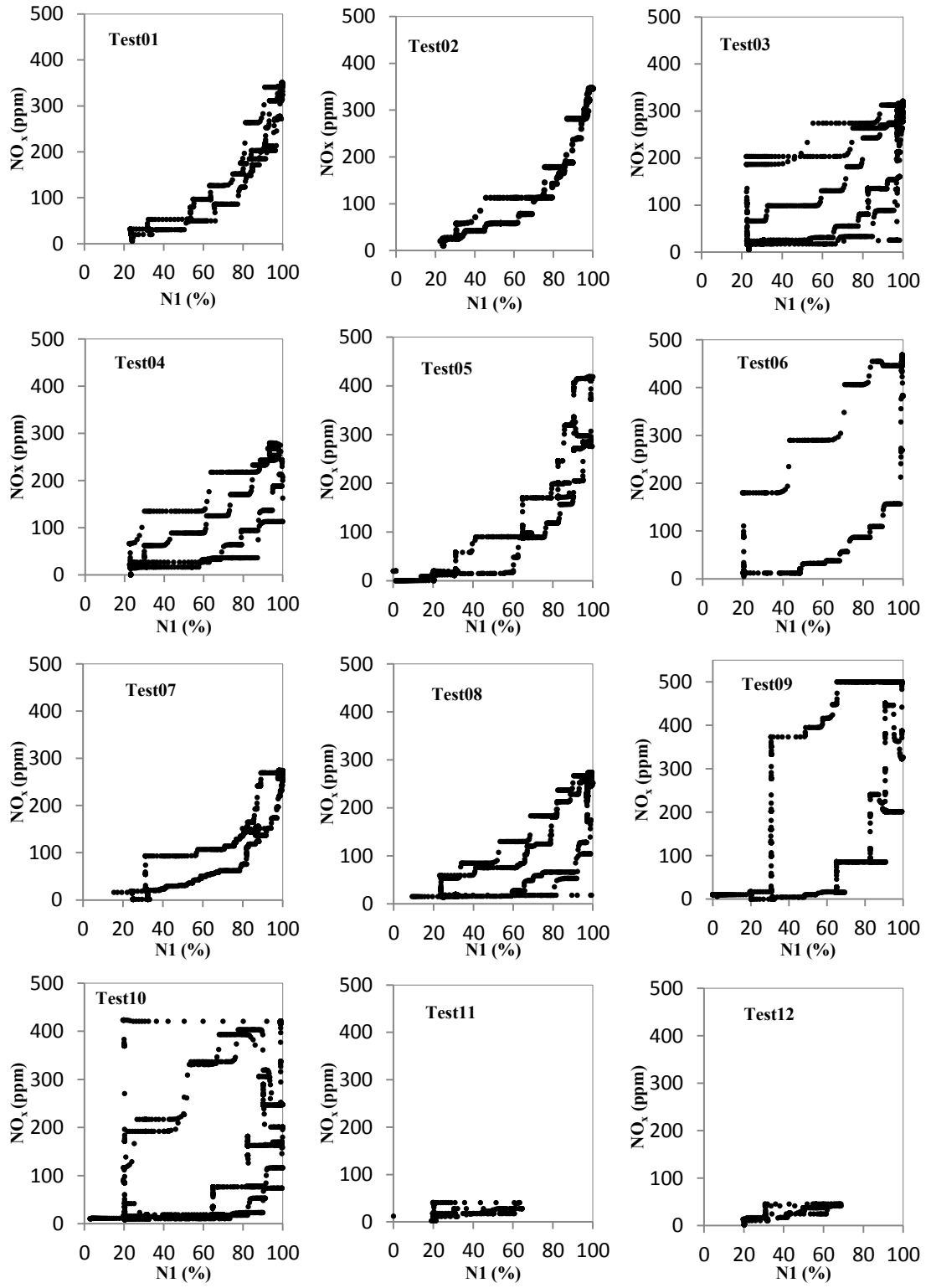
Ek-2 (Devam) Motor parametreleri ve CO konsantrasyonu



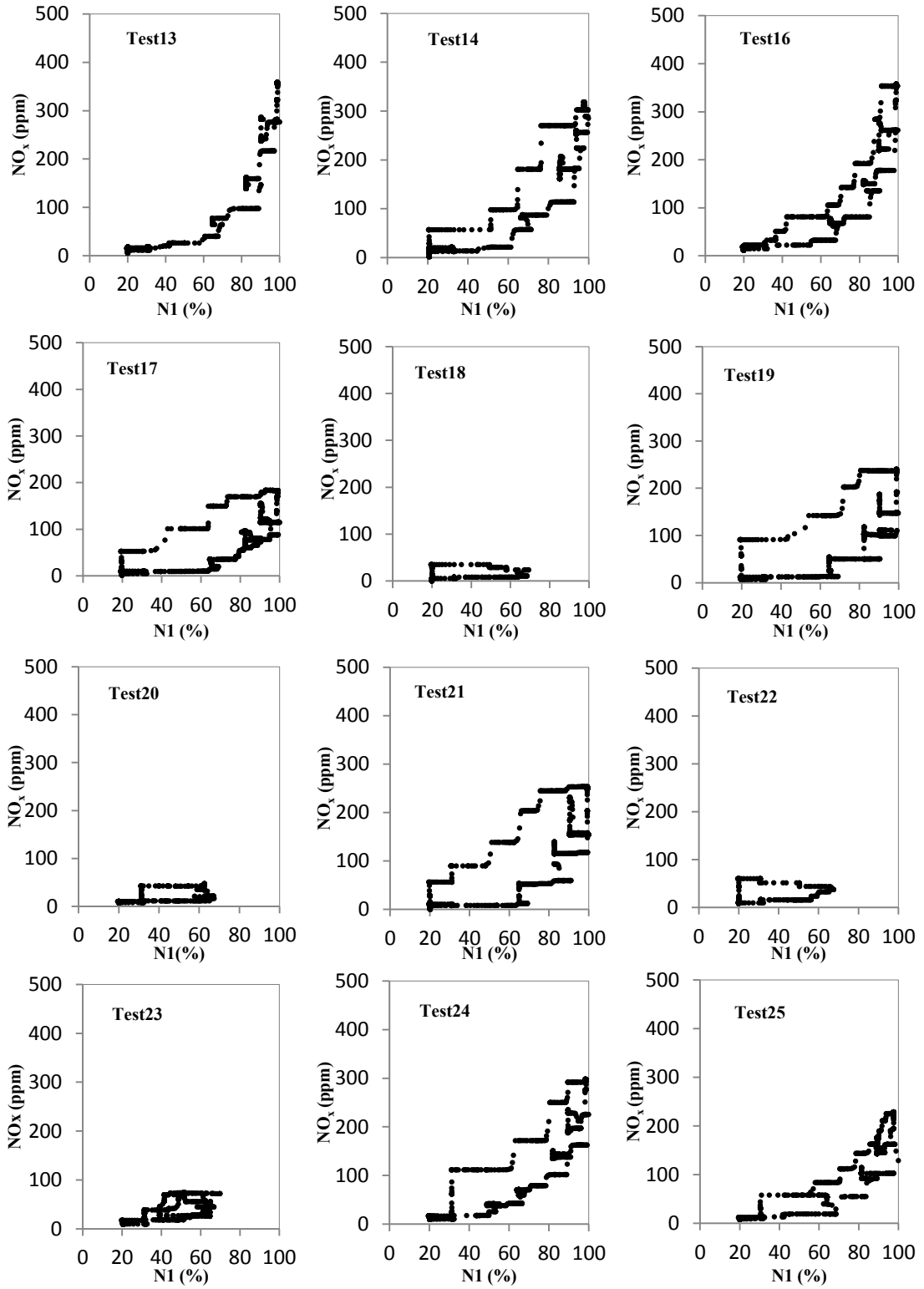
Ek-2 (Devam) Motor parametreleri ve CO konsantrasyonu



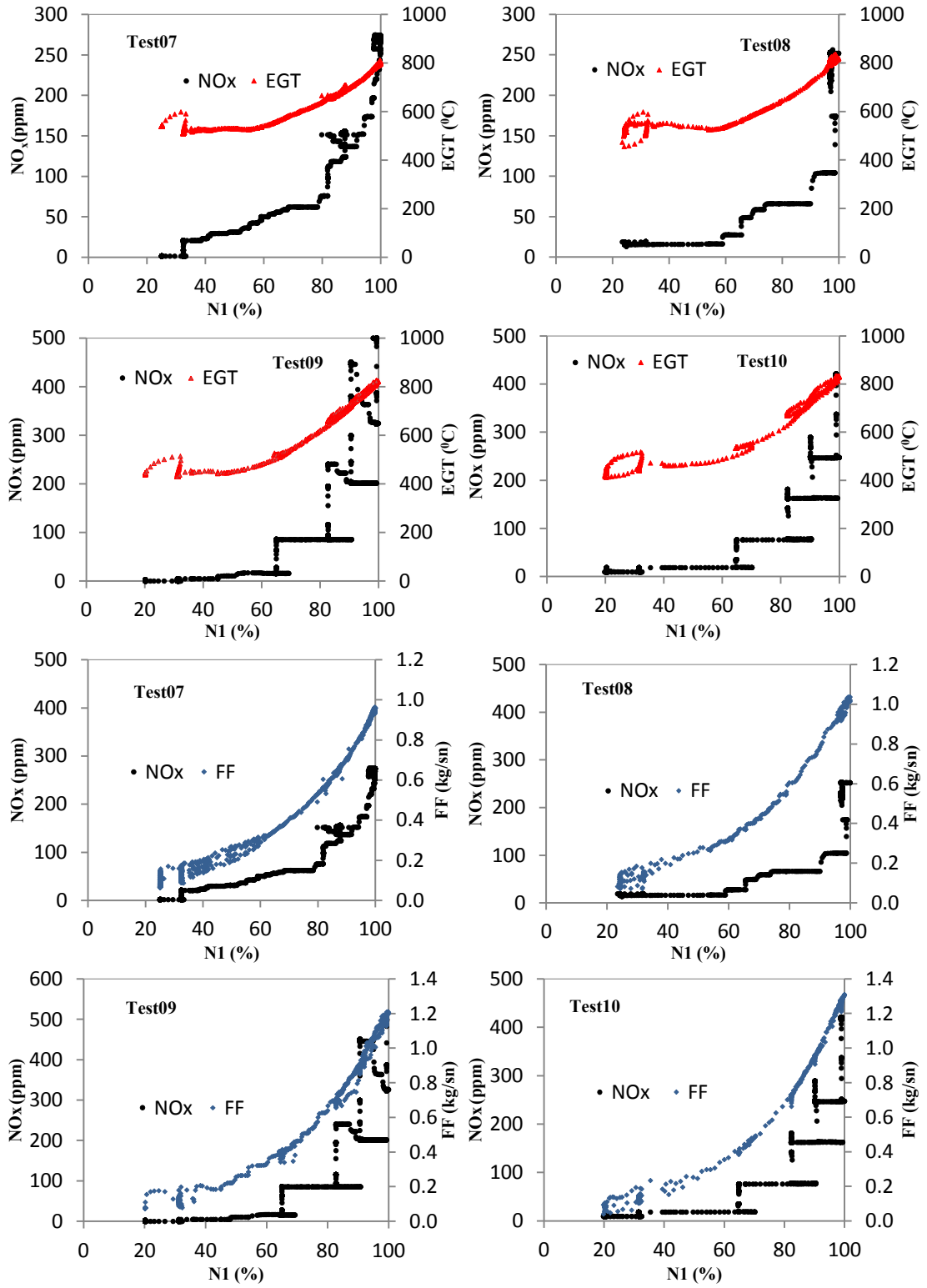
Ek-3 Motor parametreleri ve NO_x konsantrasyonu



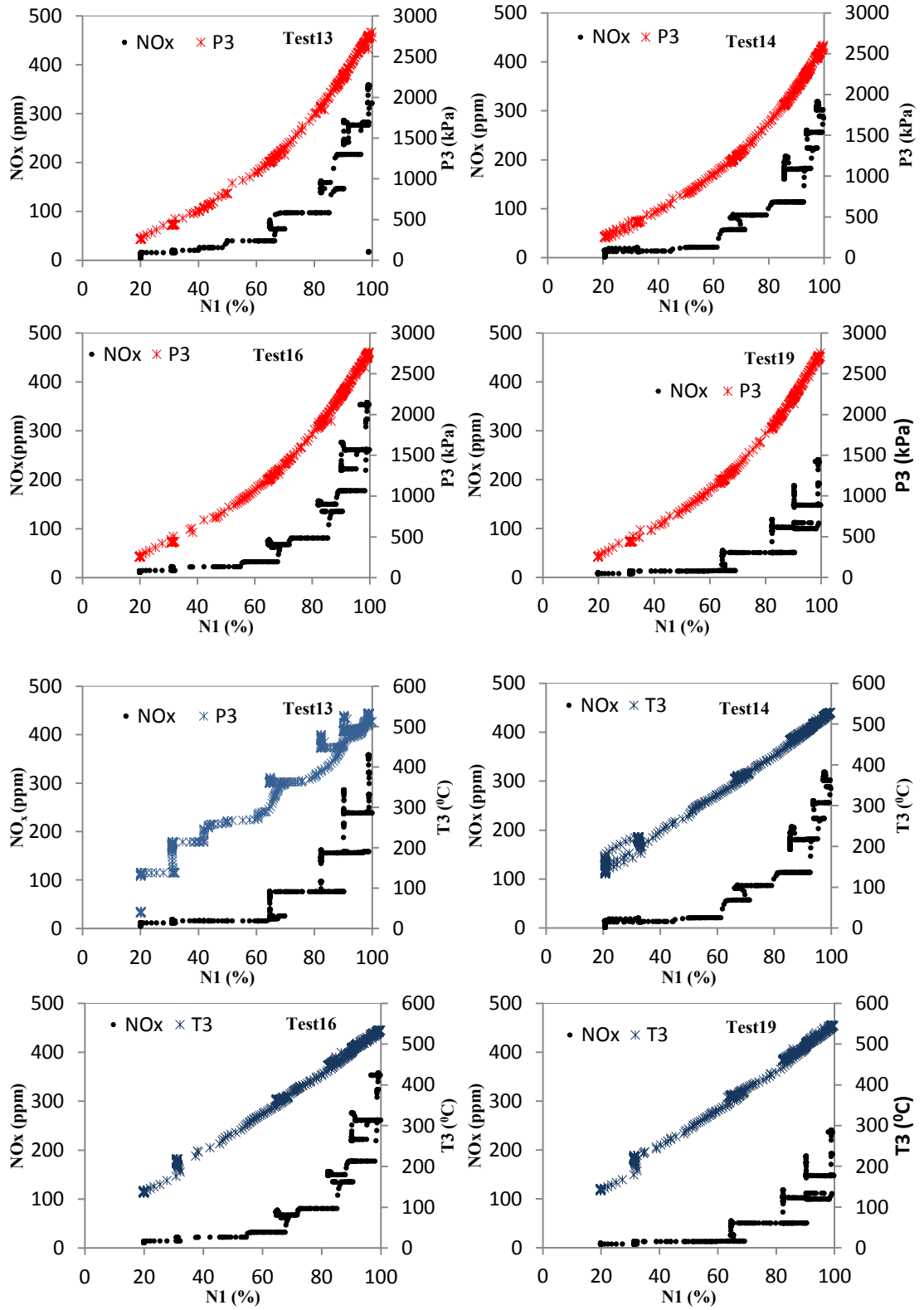
Ek-3 (Devam) Motor parametreleri ve NO_x konsantrasyonu



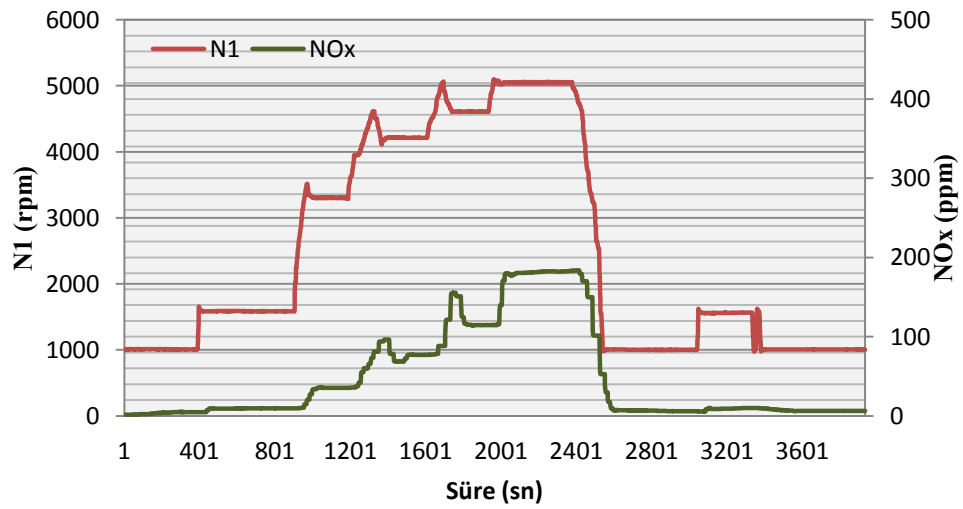
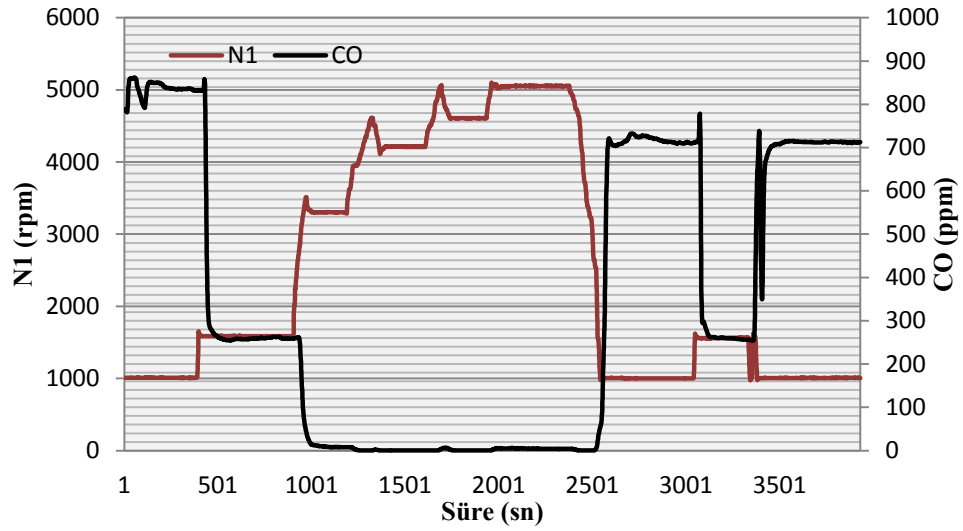
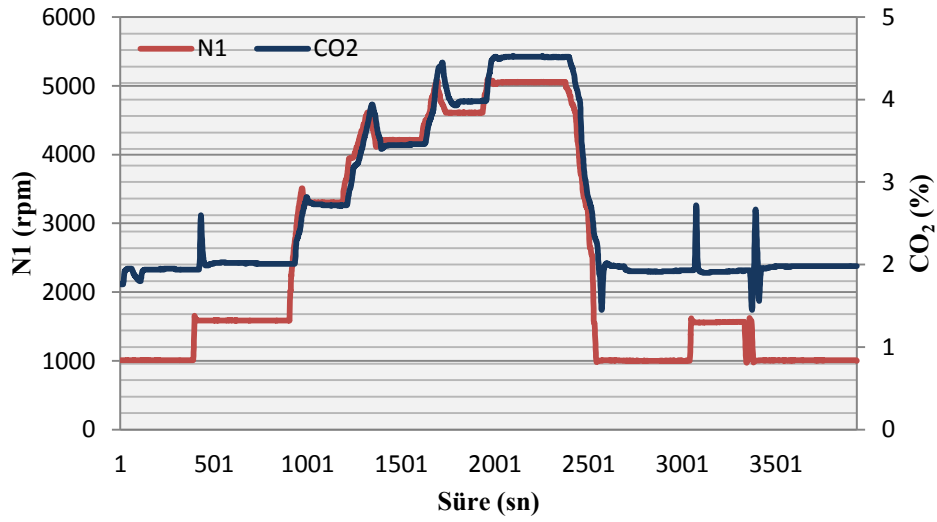
Ek-3 (Devam) Motor parametreleri ve NO_x konsantrasyonu



Ek-3 (Devam) Motor parametreleri ve NO_x konsantrasyonu



Ek-4 CO₂, CO ve NO_x'un N1 ile değişimi (Test17)



Ek-5 Motorda soğuk ve sıcak çalıştırma CO ve HC konsantrasyonları

