

# GAZ TÜRBİNLİ UÇAK MOTORLARINDA KİRLETİCİ EMİSYONLARIN İNCELENMESİ

İlker YILMAZ\*, Mustafa İLBAŞ\*\*

\*Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, 38039, Kayseri

\*\*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 06500, Teknikokullar-Ankara

[iyilmaz@erciyes.edu.tr](mailto:iyilmaz@erciyes.edu.tr), [ilbas@gazi.edu.tr](mailto:ilbas@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 28.02.2011; Kabul/Accepted: 14.02.2012)

## ÖZET

Havacılık sektörü sürekli olarak gelişme göstermektedir. Buna paralel olarak hava taşımacılığında önemli bir artış söz konusudur. Hava trafiğindeki artış uçak motorlarından kaynaklanan kirletici emisyonları artırmaktadır. Bu çalışmada, yolcu taşımacılığı ve özel amaçlar için kullanılan farklı üretici firmaların turbofan ve turbojet motorlarından kaynaklanan azotoksit (NO<sub>x</sub>), karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları incelenmiştir. Çalışmada, Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO) verileri kullanılarak motor emisyonlarının yakıt akışı ve motor güç oranı ile değişimleri belirlenmiştir. Ayrıca, çalışmada Jet A yakıtı ile biodizel olarak Metil Bütanol'ün farklı oranlarda karıştırılması ile elde edilen karışımli yakıtın CF6-80C gaz türbinli turbofan motor emisyonuna etkisi incelenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonu çalışmada incelenen motorlar için, yakıt akış miktarının artması ile arttığı belirlenmiştir. CO ve HC emisyonları ise; NO<sub>x</sub> emisyonunun tam tersine çalışmada kullanılan motor tipleri için, yüksek güçlerde düşük güçlere nazaran çok daha az seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu duruma düşük güçlerde tam yanma durumundan uzaklaşılmasının neden olduğu belirlenmiştir. Karışımli biodizel yakıtların ve saf biodizel yakıtın Jet A yakıtından daha az NO<sub>x</sub>, CO ve HC emisyonu oluşturduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Uçak motorları, gaz emisyonu, güç oranı.

## INVESTIGATION OF POLLUTANT EMISSIONS IN AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES

### ABSTRACT

Aviation sector have been improved consistently. As of the parallel to this, there is an important rising in the air transportation. Pollutant emissions from aircraft emissions increase with the increasing of the air traffic. In this study, the nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon monoxide (CO), and unburned hydrocarbon (HC) from turbofan and turbojet engines of different manufacturer companies are investigated for used passenger transportation and private intentions. In the study, the variations with fuel flow and power setting of engine emissions are determined using International Civil Aviation Organization (ICAO) data. Also, the effect of three different methyl butanoate blends including pure biodiesel fuel (100 % methyl butanoate), 20% methyl butanoate -80% Jet A fuel, and 50% methyl butanoate-50% Jet A fuel on the emissions of CF6-80C gas turbine turbofan engine has been investigated in the present study. It is determined that the NO<sub>x</sub> emission increases with the increasing of the fuel flow for investigated engines. Contrary to NO<sub>x</sub> emissions, it is also determined that the CO and HC emissions are much little levels at the high power settings comparison low power settings. It is determined that the incomplete combustion in low power settings reasons this case. It is found that the blend fuels and pure bio-fuel produce less CO, HC and NO<sub>x</sub> emissions than Jet A fuel.

**Key Words:** Aircraft engines, gas emission, power setting.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gaz emisyonlarından kaynaklanan çevresel sorunlar son yıllarda daha da artmaya başlamıştır. Bu durum atmosferde zararlı bileşiklerin serbest kalması sonucu riskler getirmektedir. 1970 yıllardan beri uçak motor üreticileri havaalanlarının hava kalitesini korumak üzere getirilen kurallara uyumluluk sağlamak, uçak emisyonları veri bankasını düzeltme ve geliştirmek için emisyonları ölçmektedir. Havaalanı çevresinde uçaklardan kaynaklanan kirleticileri kontrol etmek için Uluslar arası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO) emisyon ölçüm yöntemlerini ve uyulacak standartları oluşturmuştur. Ayrıca ICAO duman, yanmamış hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve azot oksit (NO) için eksoz emisyonları veri bankasını yayınlamıştır[1]. Hava trafik yoğunluğunda sürekli artışa paralel olarak uçak kaynaklı kirletici eksoz salınımlarında artma göstermektedir. Uçak kaynaklı kirletici emisyon üzerine yapılan literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır. Arrigone ve Hilton [2] Fourier dönüşüm kızıl ötesi spektroskopisi kullanarak gaz türbin motorlarından kaynaklanan hidrokarbon emisyonlarını ölçmüşlerdir. Spicer ve Ark.[3] C-130 turboprop motorda ve F-15 turbofan uçağının gaz emisyonlarını yer şartlarında numune probu kullanarak beş farklı güç konumunda incelemişlerdir. C-130 turboprop motorunun F-15 turbofan motoruna göre daha yüksek CO ve organik madde açığa çıkardığı ve daha az NO<sub>x</sub> emisyonu salınımı oluşturduğu belirlenmiştir. Habib ve Ark.[4] 30 kW gücünde bir gaz türbin motorunda jet yakıtı biodizel ilavesinin emisyon ve motor performansına etkisini belirlemişlerdir. Çalışmada jet yakıtı biodizel ilavesi ile CO ve NO emisyonlarının azaldığı, ısıl verimin arttığı ve thrust değerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Sorokin ve Arnold [5] geliştirdikleri model ile gaz türbinli uçak motorlarının emisyonlarındaki organik pozitif iyonları ölçmüşlerdir. Partikül emisyonları ile ilgili ticari uçakların motorlarında ince partikül emisyonlarının fiziksel karakteristiklerini Kinsey ve Ark.[6] deneysel olarak araştırmışlardır. Diğer bir çalışmada, Agrawal ve Ark. [7] CFM56-7 ve CFM56-3 turbofan motorları için farklı motor güç oranında emisyonların partikül ve kimyasal karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Gaz türbinli motorlarda seyir esnasında uçak arkasında farklı akış rejimleri için CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, sıcaklık ve duman çapını incelemişlerdir. Schumann ve Ark. [8] uçuş halindeki uçakların eksoz dumanlarının dağıtılması üzerine yaptıkları çalışmada üst troposfer ve alt stratosfer içinde uçan sesaltı ve sesüstü uçaklarda CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, sıcaklık ve duman çapını incelemişlerdir. RB211-535-E4 turbofan motorunda rölanti ve %60 güç çıkışları için eksoz emisyonları kromatografik yöntemle Anderson ve Ark.[9] tarafından incelenmiştir. Emisyonların güç oranına büyük ölçüde bağımlı olduğu belirlenmiştir. Sorokin ve Arnold [10] tarafından yapılan çalışmada, uçak gaz türbin yakıcısında duman partiküllerinin

belirlenmesi için teorik bir model kullanılmıştır. Teorik model sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmış ve iyi uyumlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada, yolcu taşımacılığı ve özel amaçlar için kullanılan farklı üretici firmaların turbofan ve turbojet motorlarından kaynaklanan azotoksit (NO<sub>x</sub>), karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonları, ICAO veri tabanından temin edilen veriler yardımıyla farklı motor güçlerinde incelenmiştir.

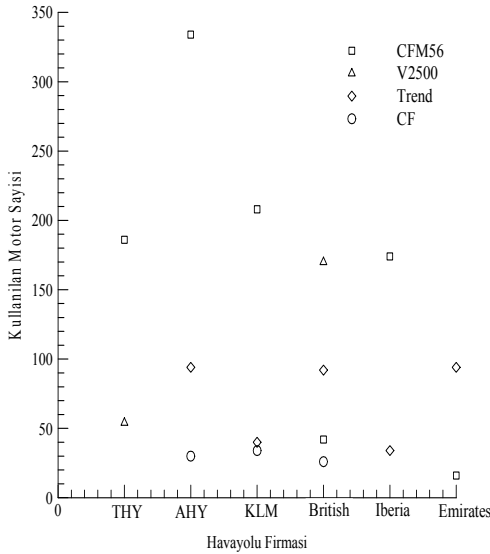
## 2. MOTOR EMİSYONLARININ İNCELENMESİ (INVESTIGATION OF ENGINE EMISSIONS)

Motor emisyonlarının değerlendirilmesinde beş farklı üretici firmanın turbofan motorlarının NO<sub>x</sub>, CO ve HC emisyonlarının dört farklı motor çalışma yüküne (rölanti, yaklaşma, tırmanma, kalkış) göre değişimlerini incelemek üzere ICAO data bankasındaki verilerden yararlanılmıştır. Bu motorların bypass oranları birbirine yakın olanların emisyon performansları motor yüküne bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan motorlar ve işletme şartları Tablo 1'de verilmiştir. Motor tipinin seçiminde Dünyanın önde gelen havayolları (Türk Havayolları (THY), Amerikan Havayolları (AHY), KLM (Hollanda Havayolları), İngiliz Havayolları (İHY), Iberia Havayolları (IHY), Emirates Havayolları (EHY)) tarafından sıklıkla kullanılan motor tiplerinin seçimi göz önüne alınmıştır (Şekil 1).

ICAO databank [1]'dan bypass oranları sırasıyla 4,3; 5; 5,13; 4,3 olan CF6-50E2, CF6-80A, CF34-8C1, CF6-45A2 turbofan motorlarının rölantide (%7), yaklaşımda (%30), tırmanmada (%85) ve kalkışta (%100) NO<sub>x</sub> emisyon değişimleri Şekil 2a-e'de görülmektedir. Bu motorlar için ölçüm testleri Jet-A yakıtı kullanılarak alınmıştır. Dolayısıyla yakıtın kaynaklanan etki içermemektedir. Motor emisyon değerleri incelendiğinde CF34-8C1 motoru %85'de 12,82 g/kg ve %100'de 14,67 g/kg seviyelerinde diğer CF serisi motorlara nazaran çok daha az NO<sub>x</sub> emisyonu açığa çıkarmaktadır. CF6-50E2 motoru ise; motor yük durumuna bağlı olarak diğer motorlardan daha fazla NO<sub>x</sub> emisyonu açığa çıkarmaktadır (%7'de 3,6 g/kg, %30'da 9,5 g/kg, %85'de 29,7 g/kg ve %100'de 36,5 g/kg). CF serisi turbofan motorlarının açığa çıkardığı NO<sub>x</sub> seviyeleri özellikle yüksek motor çalışma yüklerinde (%85 ve %100) artma göstermektedir. CF6-80A ve CF6-45A2 turbofan motorları için motor yüküne bağlı olarak NO<sub>x</sub> emisyon seviyelerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Motor gücünde artma ile NO emisyonu tüm motorlarda artma göstermiştir (Şekil 2a-e). Literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alındığında Spicer ve Ark.[3] çalışmasında aynı bulgular tespit edilmiştir.

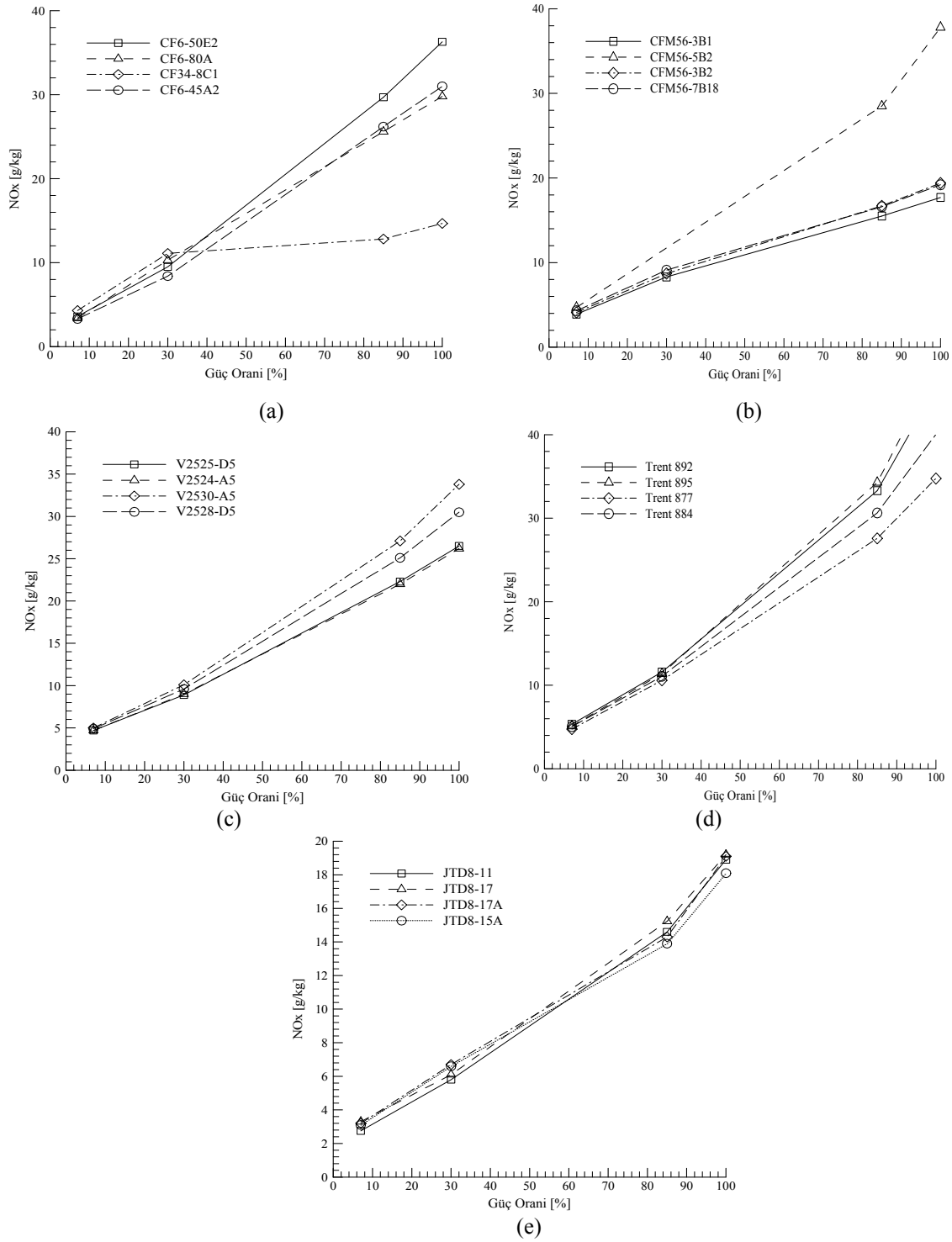
**Tablo 1.** Kullanılan motorlar ve işletme şartları[1] (Used engines and their operating conditions)

Sıra N.	Üretici	Motor	Motor Tipi	Bypass Oranı	Yakıt
1	General Electric	CF6-50E2	Turbofan	4,3	Jet A
		CF6-80A		5	
		CF34-8C1		5,13	
		CF6-45A2		4,3	
2	CFM International	CFM56-3B1	Turbofan	5,1	Jet A
		CFM56-5B2		5,6	
		CFM56-3B2		5,1	
		CFM56-7B18		5,5	
3	International Aero Engine	V2525-D5	Turbofan	4,82	Jet A
		V2524-A5		4,81	
		V2530-A5		4,54	
		V2528-D5		4,66	
4	Rolls- Royce Ltd	Trent 892	Turbofan	5,7	Jet A
		Trent 895		5,7	
		Trent 877		6,02	
		Trent 884		5,87	
5	Pratt & Whitney Aircraft Group	JT8D-11	Turbofan	1	Jet A
		JT8D-17		1,01	
		JT8D-17A		1,05	
		JT8D-15A		1,08	

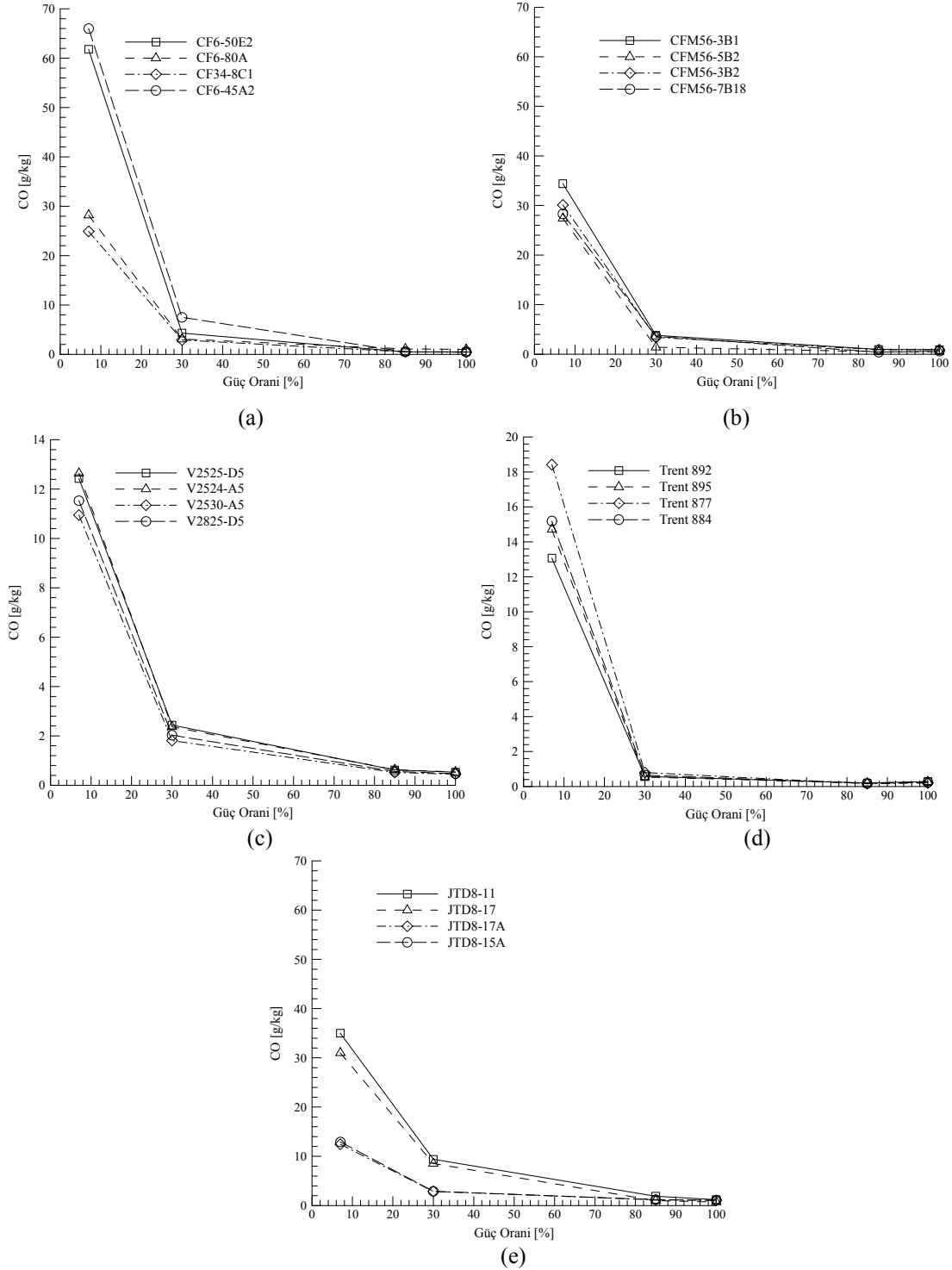
**Şekil 1.** Dünyadaki bazı havayollarında kullanılan uçak motor tipleri (Aircraft engine types used in the world's largest airlines)

CF serisi turbofan motorların dört farklı güç oranında CO emisyon seviyeleri Şekil 3a-e'de verilmiştir. Test sırasında kullanılan CF6-50E2 motorunda %7, %30, %85 ve %100 güç değerlerinde sırasıyla 61,8; 4,3; 0,5; 0,5 g/kg CO emisyon seviyeleri tespit edilmiştir. Diğer bir motor olan CF6-80A motorunda ise; %7, %30, %85, %100 güç değerlerinde sırasıyla 28,2; 3,1; 1,1; 1 g/kg değerlerinde CO emisyonu elde edilmiştir. CF34-8C1 motorunun ise; %7, %30, %85 ve %100 güç değerlerinde sırasıyla 24,92; 2,91; 0,5; 0,41 g/kg CO emisyonu açığa çıkardığı görülmektedir.

CF6-45A2 motorunda ise %7, %30, %85, %100 güç değerlerinde sırasıyla 66; 7,5; 0,5; 0,5 g/kg CO emisyonu belirlenmiştir. Bu değerlerden CF6-50E2 ve CF6-45A2 motorları diğer iki motora göre bütün güç değerlerinde çok daha fazla CO emisyonu yaymaktadır. Ayrıca bütün motor tiplerinde, %7 ve %30 düşük güç değerlerinde CO emisyonu yüksek çalışma yüklerine (%85 ve %100) göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Yüksek güç değerlerinde CO emisyon değerlerinin yakıtın içerisindeki karbonun tam olarak CO<sub>2</sub> oksitlenmesinden dolayı hemen hemen sıfır seviyelerinde olduğu görülmektedir. Benzer bulgular, Spicer ve Ark.[3]'nün çalışmasında tespit edilmiştir.



**Şekil 2.** Güç oranı ile NOx emisyonunun değişimi: a) CF6, b) CFM56, c) V2525, d) Trent 800, e) JTD8 (Variation of NOx emission with power setting: a) CF6, b) CFM56, c) V2525, d) Trent 800, e) JTD8)



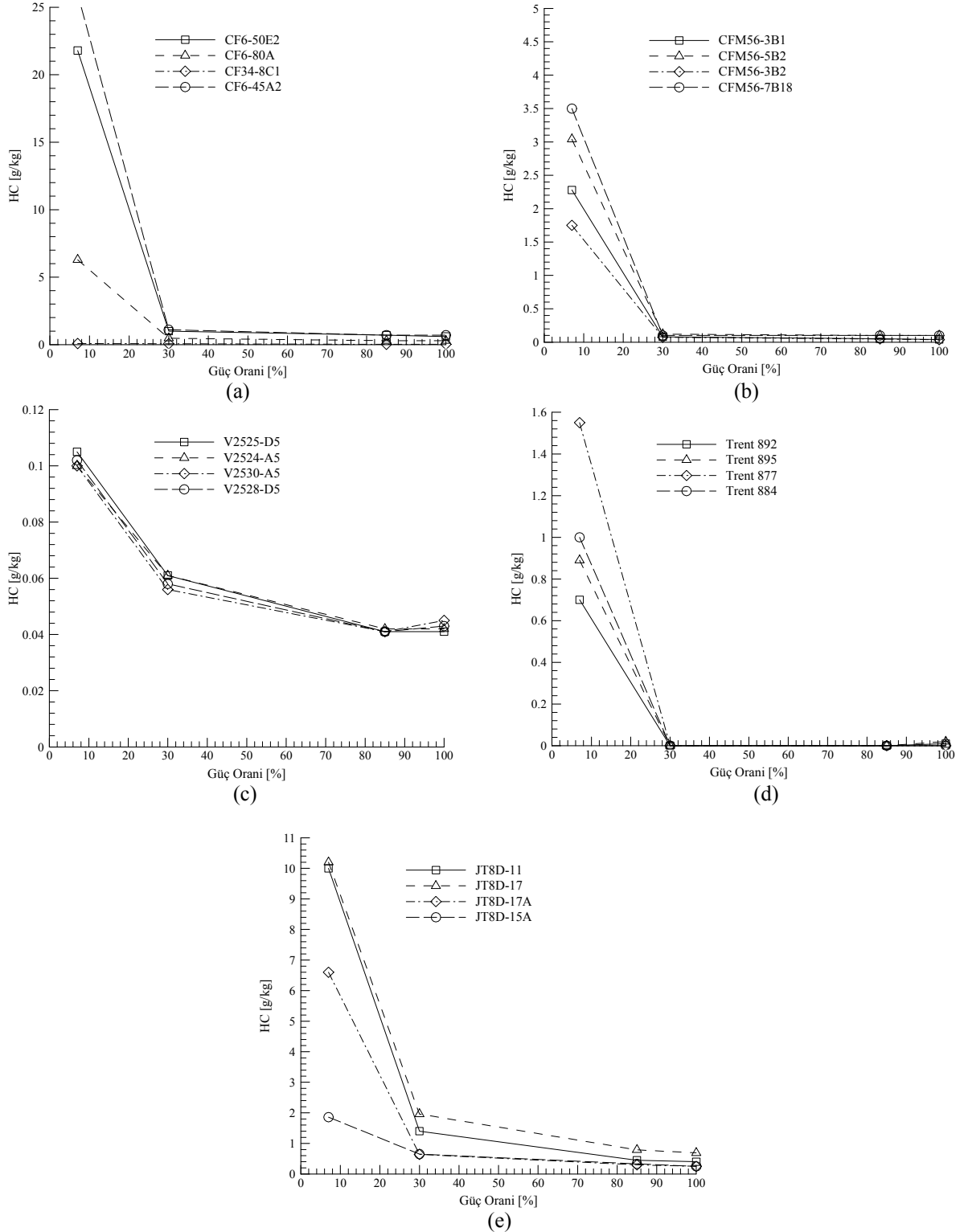
**Şekil 3.** Güç oranı ile CO emisyonunun değişimi: a-) CF6, b) CFM56, c) V2525, d) Trent 800, e) JTD8 (Variation of CO emission with power setting: a) CF6, b) CFM56, c) V2525, d) Trent 800, e) JTD8)

Rölantide (%7), yaklaşımda (%30), tırmanmada (%85) ve kalkışta (%100) HC emisyonları bypass oranları sırasıyla 4,3; 5; 5,13; 4,3 olan CF6-50E2, CF6-80A, CF34-8C1, CF6-45A2 turbofan motorlarının hidrokarbon emisyonları (HC) Şekil 4a'da, 5,1; 5,6; 5,1; 5,5 bypass oranlarındaki CFM56-3-B1, CFM56-5B2, CFM56-3B-2, CFM56-7B18 turbofan motorlarının Şekil 4b'de, bypass oranları sırasıyla 4,82; 4,81; 4,54; 4,66 olan V2525-D5, V2524-A5, V2530-A5, V2528-D5 turbofan motorları

için aynı güç oranlarında HC emisyonları Şekil 4c'de, bypass oranları sırasıyla 5,7; 5,7; 6,02; 5,87 olan Trent 892, Trent 895, Trent 877, Trent 884 turbofan motorlarının HC emisyonları Şekil 4d'de ve bypass oranları sırasıyla 1; 1,01; 1,05; 1,08 olan JT8D-11, JT8D-17, JT8D-17A ve JT8D-15A turbofan motorlarının HC emisyonlarının değişimi ise; Şekil 4e'de verilmiştir. Güç oranının artışı ile (%7'den %100'e) bütün motor tiplerinde HC emisyonları azalma eğilimi gösterdiği Şekil 4'den görülmektedir.

Bu durum yanmanın dolayısıyla kimyasal reaksiyon oranında iyileşmenin etkisi ile meydana gelmektedir.

Benzer sonuçlar, Arrigone ve Hiltonun [2] çalışmasında da gözlemlenmiştir.



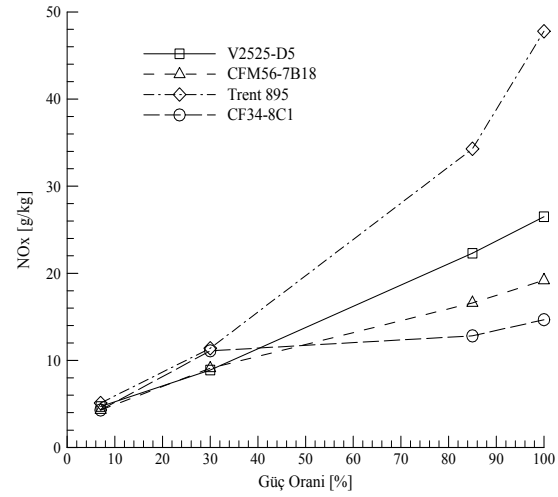
**Şekil 4.** Güç oranı ile HC emisyonun değişimi: a) CF6, b) CFM56, c) V2525, d) Trent 800, e) JTD8 (Variation of HC emission with power setting: a) CF6, b) CFM56, c) V2525, d) Trent 800, e) JTD8)

### 3. MOTOR EMİSYONLARININ KARŞILAŞTIRMASI (COMPARISON OF ENGINE EMISSIONS)

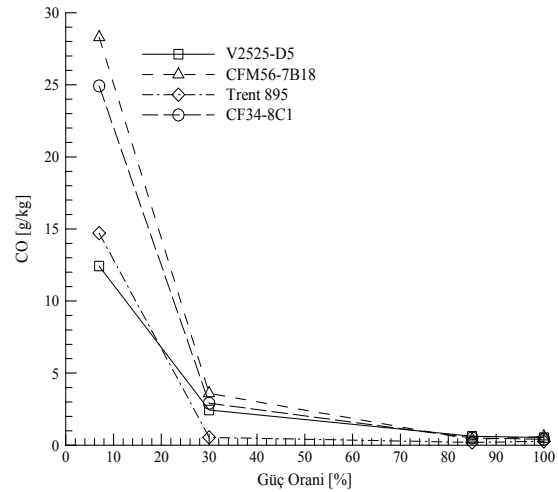
V2525-D5, CFM56-7B18, Trent 895, CF34-8C1 turbofan motorlarının dört farklı güç oranında (rölanti, yaklaşma, tırmanma ve kalkış) ve sırasıyla bypass oranları 4,82; 5,5; 5,7; 5,13 olmak üzere NOx emisyon karşılaştırması Şekil 5’de, CO emisyon karşılaştırması ise; Şekil 6’da ve HC emisyonu karşılaştırması ise; Şekil 7’de verilmiştir. V2525-D5 motorunda rölanti (%7), yaklaşma (%30), tırmanma (%85) ve kalkış (%100) güç değerlerinde sırasıyla 4,7; 8,9; 22,3; 26,5 g/kg seviyelerinde NOx emisyonu salınımı olduğu Şekil 5’de görülmektedir. CFM56-7B18 motorunda ise; aynı güç oranlarında (motor yüklerinde) sırasıyla 4,3; 9,1; 16,6; 19,2 g/kg NOx emisyon seviyeleri belirlenmiştir. Trent 895 motorunda ise; yine aynı güç değerleri dikkate alındığında sırasıyla 5,11; 11,39; 34,29; 47,79 g/kg NOx emisyon seviyeleri elde edilmiştir. CF34-8C1 motorunda ise; sırasıyla 4,31; 11,1; 12,82; 14,67 g/kg NOx emisyon seviyeleri belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alındığında, dört motor içinde motor yükünün artışı ile artan sıcaklıktan dolayı NOx emisyon değerleri artma göstermektedir. Trend 895 motoruna ait NOx emisyon değerleri ise; diğer üç motora ait NOx değerlerinden daha fazladır. Bu motor için yüksek güç oranlarında (kalkış, %100) hemen hemen diğer motorların üç katı daha fazla NOx emisyonu oluşmaktadır. En düşük NOx seviyesi dört farklı motor yük oranı içinde CF34-8C1 motorunda ölçülmüştür. V2525-D5 motoru ise; Trend 895 motorundan sonra en fazla NOx emisyonu açığa çıkarmaktadır. CFM56-7B18 motoru ise, CF34-8C1 motoruna yakın bir performans gösterirken en az NOx emisyonu yayan ikinci motor konumunda bulunmaktadır. Düşük motor yükünde (rölanti, %7) alev sıcaklığının daha düşük ve birbirlerine daha yakın olmaları nedeniyle dört motorda da hemen hemen aynı seviyelerde olduğu belirlenmiştir.

V2525-D5, CFM56-7B18, Trent 895, CF34-8C1 turbofan motorlarının dört farklı motor yükünde (rölanti, yaklaşma, tırmanma ve kalkış) için CO emisyon karşılaştırması Şekil 6’da sunulmuştur. V2525-D5 motorunda %7, %30, %85 ve %100 güç değerlerinde sırasıyla 12,43; 2,44; 0,62; 0,53 g/kg CO emisyon seviyeleri belirlenmiştir. CFM56-7B18 motorunda ise; aynı güç değerlerinde sırasıyla 28,3; 3,6; 0,4; 0,6 g/kg CO emisyon değerleri elde edilmiştir. Trent 895 motorunda aynı güç oranları için sırasıyla 14,71; 0,54; 0,19; 0,27 g/kg CO emisyonu belirlenmiştir. CF34-8C1 motorunda ise; aynı güç değerlerinde sırasıyla 24,92; 2,91; 0,5; 0,41 g/kg CO değerleri tespit edilmiştir. Bu veriler dikkate alındığında, motor yükünün artışı paralel olarak tam yanmanın sağlanması ile CO emisyonunun oksitlenerek CO<sub>2</sub> dönüştüğü ve dolayısıyla CO emisyon seviyelerinin azaldığı anlaşılmaktadır.

CFM56-7B18 motoru rölanti (%7) ve yaklaşımda (%30) en fazla CO emisyonu açığa çıkaran motor olarak gözükmektedir. CF34-8C1 motoru onu takip etmektedir. Rölanti ve yaklaşma şartlarında V2525-D5 motoru ve Trent 895 motoru daha az CO emisyonu yaymaktadır. Daha yüksek motor güç oranlarında (%85 ve %100) dört motorunda birbirine çok yakın CO emisyonu açığa çıkardığı görülmektedir.



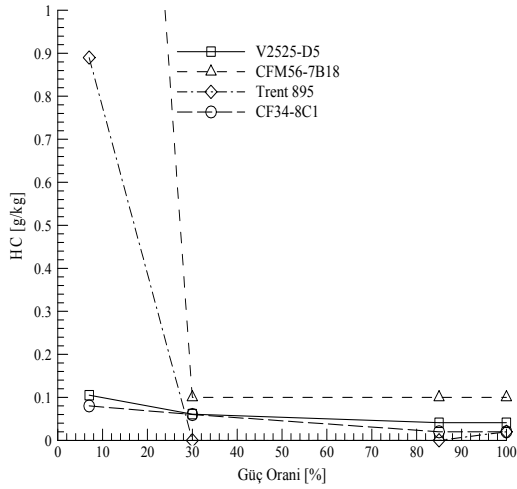
Şekil 5. Farklı turbofan motorların güç oranı ile NOx emisyonu değişimi (Variation of NOx emission with power setting for different turbofan engines)



Şekil 6. Farklı turbofan motorların güç oranı ile CO emisyonu değişimi (Variation of CO emission with power setting for different turbofan engines)

V2525-D5, CFM56-7B18, Trent 895, CF34-8C1 turbofan motorlarının dört farklı güç oranında (rölanti, yaklaşma, tırmanma ve kalkış) HC emisyon değişimleri Şekil 7’de verilmiştir. V2525-D5 motorunda %7, %30, %85 ve %100 güç değerlerinde sırasıyla 0,105; 0,061; 0,041; 0,041 g/kg HC emisyon seviyeleri belirlenmiştir. CFM56-7B18 motorunda ise %7, %30, %85, %100 güç değerlerinde sırasıyla 3,5; 0,1; 0,1; 0,1 g/kg HC emisyon değerleri tespit edilmiştir. Trent 895 motorunda ise; %7, %30, %85

ve %100 güç değerlerinde sırasıyla 0,89; 0; 0, 0,02 g/kg HC emisyonu açığa çıktığı belirlenmiştir. CF34-8C1 motorunda ise; %7, %30, %85, %100 güç değerlerinde sırasıyla 0,08; 0,06; 0,02; 0,02 g/kg HC emisyonu tespit edilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, düşük motor yükünde (rölanti) yanma sıcaklığının düşük olmasından ötürü HC emisyonu yüksek güç değerlerine (kalkış) göre daha fazladır. CFM56-7B18 motoru ise özellikle %7 güç değerinde diğer üç motora göre çok daha fazla HC emisyonu yaymaktadır. Trent 895 motoru ise; CFM56-7B18 motorundan sonra %7 güç değerinde en fazla HC emisyonu açığa çıkarmaktadır. V2525-D5 ve CF34-8C1 motorlarından ise tüm güç değerlerinde çok düşük HC emisyon salınımı olmaktadır.



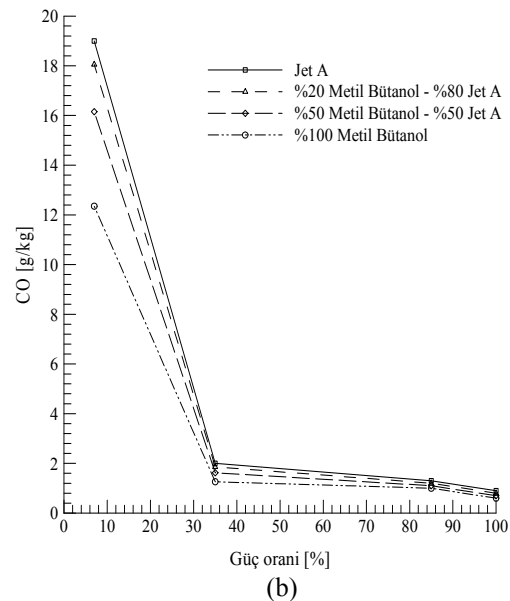
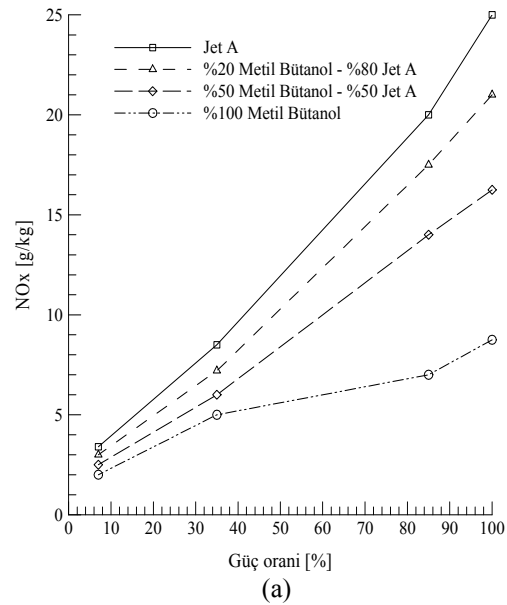
**Şekil 7.** Farklı turbofan motorların güç oranı ile HC değişimi (Variation of HC emission with power setting for different turbopfan engines)

#### 4. YAKIT KARIŞIMLARININ EMİSYONLARA ETKİSİ (EFFECT OF FUEL BLENDS ON EMISSIONS)

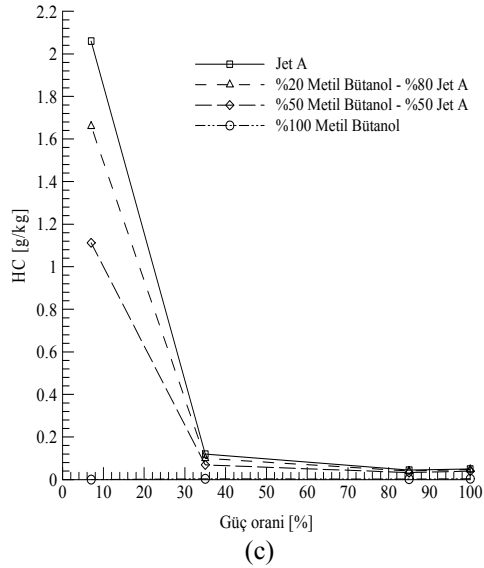
Uluslararası havacılık otoriteleri (Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO), Federal Havacılık Kurumu (FAA) vb.) uçak gaz türbinli motorlardan kaynaklanan emisyonları aşağı limitlere düşürmek için yeni kurallar getirmektedirler. Bu durumda Dünya genelinde uçak motor üreticilerinin dolayısıyla uçak gaz türbinli motorlarında bu limitler içerisinde kalması gerekecektir.

Gelecekte Jet A yakıtı kullanılan gaz türbin motorlarının açığa çıkardığı emisyonlar, havacılık otoritelerinin sürekli aşağıya çekmeye çalıştıkları emisyon limitlerinin üzerinde kalacaktır ve bu limitlere Jet A kullanılan gaz türbinli motorların uyması oldukça zor olacaktır. Bu konuda Jet A yakıtına belirli oranlarda biodizel yakıtının katılarak elde edilecek Jet A-Biodizel yakıt karışımı havacılık otoritelerinin belirlediği emisyon limitlerine uymada ve hava kirliliğini azaltmak için bir çözüm olacaktır. Bu kapsamda, çalışmada halen yaygın olarak gaz türbinlerinde kullanılan Jet A yakıtı ile biodizel olarak Metil Bütanol'ün farklı oranlarda karıştırılması ile

elde edilen karışimli yakıtın CF6-80C gaz türbinli turbofan motor emisyonuna etkisi incelenmiştir. Yakıt karışımlarının uçak motor emisyonuna etkisini incelemek üzere Leong ve Wilson [11] tarafından yapılan çalışmadaki emisyon dataları kullanılmıştır. %20 Metil Bütanol-%80 Jet A, %50 Metil Bütanol-%50 Jet A, %100 Metil Bütanol yakıtları Jet A yakıtının NO<sub>x</sub>, CO ve HC emisyonları Şekil 8a-c'de karşılaştırılmıştır. Karışimli yakıtlar (%20 Metil Bütanol-%80 Jet A, %50 Metil Bütanol-%50 Jet A) ve saf biodizel yakıt (%100 Metil Bütanol Yakıt) Jet A yakıtından daha az NO<sub>x</sub>, CO ve HC emisyonu açığa çıkarttığı görülmektedir (Şekil 8a-c). %100 Metil Bütanol kullanıldığında hidrokarbon emisyonu (HC) açığa çıkmamaktadır (Şekil 8c). Bu durum Habib ve Ark.[4] elde ettiği sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Motor güç oranının artması ile NO<sub>x</sub>, CO ve HC emisyon seviyelerinde artma olduğu Şekil 8a-c'den görülmektedir.







**Şekil 8.** Farklı yakıt karışımlarının uçak motor emisyonlarına etkisi: a) NO<sub>x</sub>, b) CO, c) HC (Effect of different fuel blends on aircraft engine emissions: a) NO<sub>x</sub>, b) CO, c) HC).

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kirletici emisyonlar gaz türbinli motorların tasarımında ve performansında önemli bir yer tutmaktadır. Değişiklik kaynakları ile salınan kirleticiler nedeniyle hava kirliliğinin sürekli artışı ve canlılar için tehlikeli seviyelere ulaşması sonucu Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO), uçaklarda yaygın olarak kullanılan gaz türbinli motorlar için emisyon sınırlamalarını getirmiştir. Hava yolları envanterlerinde bulunan uçaklarda kullandıkları gaz türbinli motorlarda ICAO tarafından getirilen emisyon sınırlamalarına uymak durumundadır.

Sunulan çalışmada, ICAO verileri[1] kullanılarak General Electric (CF), CFM56, Rolls Royce, Pratt Whitney, International Aero Engines (IAE) motorlarına ait azot NO<sub>x</sub>, CO ve HC emisyon değerleri yakıt akış miktarları ve farklı güç oranları için incelenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonunun eksoz sıcaklığı arttıkça, dolayısıyla motor gücü arttıkça, arttığı belirlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonu ile motor gücünün değişimi Spicer ve Ark.[3] çalışması ile uyumluluk göstermektedir. Hidrokarbon ve karbon monoksit emisyonlarının da ise tam tersi bir durum söz konusudur. Bu emisyonlar yanmanın verimsiz olduğu rölanti gibi güç seviyelerinde çok daha fazla görülmekte iken, yüksek güç seviyelerinde çok daha az seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Anderson ve Ark.[9] çalışmasında daha yüksek güç oranında düşük güç oranına nazaran karbon emisyonlarının daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durum sunulan çalışma sonuçları ile uyumludur. Çalışmada, karışımı biodizel yakıtların ve saf biodizel yakıtın Jet A yakıtından daha az NO<sub>x</sub>, CO ve HC emisyonu oluşturduğu tespit edilmiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (ERÜ/BAP) tarafından FBA-09-1147 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank. ICAO-9646-AN/943, International Civil Aviation Organization. Montreal, Canada, 1st ed., 1995.
2. Arrigone, G.M., Hilton, M., Theory and practice in using Fourier transform infrared spectroscopy to detect hydrocarbons in emissions from gas turbine engines, *Fuel*, 84, 1052-1058, 2005.
3. 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., Hashmonay, R., 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, 2009.
4. Habib, Z., Parthasarathy, R., Gollahalli, S., Performance and emission characteristics of biofuel in a small-scale gas turbine engine, *Applied Energy*, 87, 1701-1709, 2010.
5. Sorokin, A., Arnold, F., Organic positive ions in aircraft gas-turbine engine exhaust, *Atmospheric Environment*, 40, 6077-6087, 2006.
6. Kinsey, J.S., Yuanji, Y., Williams, D.C., Logan, R., Physical characterization of the fine particle emissions from commercial aircraft engines during the Aircraft Particle Emissions Experiment (APEX) 1-3, *Atmospheric Environment*, 44, 2147-2156, 2010.
7. Agrawal, H., Sawant, A.A., Jansen, K., Miller, J.W., Cocker, D.R., Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines, *Atmospheric Environment*, 42, 4380-4392, 2008.
8. Schumann, U., Schlager, H., Arnold, F., Baumann, R., Haschberger, P., Klemm, O., Dilution of Aircraft Exhaust Plumes at Cruise Altitudes, *Atmospheric Environment*, 32, 3097-3103, 1998.
9. Anderson, B.E., Chen, G., Blake, D.R., Hydrocarbon emissions from a modern commercial airliner, *Atmospheric Environment*, 40, 3601-3612, 2006.
10. Sorokin, A., Arnold, F., Electrically charged small soot particles in the exhaust of an aircraft gas-turbine engine combustor: comparison of model and experiment, *Atmospheric Environment*, 38, 2611-2618, 2004.
11. Leong, C., Wilson, C.W., **Prediction of aircraft emissions in LTO cycle with alternative fuel by Genetic algorithm**, University of Sheffield, Department of Mechanical Engineering, Report number: 122414, 2009.

