

Turbo Beslemeli Benzinli Havacılık Motorunun Yüksek İrtifalarda
Performans ve Yakıt Tüketimi Parametrelerinin Araştırılması

Tutku Cemre Hatipoğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Temmuz 2021

Investigation of Performance and Fuel Consumption Parameters of
Turbocharged Gasoline Aviation Engine at High Altitudes

Tutku Cemre Hatipoğlu

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Aviation Science and Technologies

June 2021

Turbo Beslemeli Benzinli Havacılık Motorunun Yüksek İrtifalarda
Performans ve Yakıt Tüketimi Parametrelerinin Araştırılması

Tutku Cemre Hatipoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. L. Berrin Erbay

Temmuz 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. L. Berrin ERBAY danışmanlığında hazırlamış olduğum “Turbo Beslemeli Benzinli Havacılık Motorunun Yüksek İrtifalarda Performans ve Yakıt Tüketimi Parametrelerinin Araştırılması” başlıklı yüksek lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 02/07/2021

Tutku Cemre HATİPOĞLU

ÖZET

Dizel veya benzinli pistonlu motorlar havacılık sektöründe uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle sivil sportif hava araçlarında kullanılan en yaygın motor tipi pistonlu motorlardır.

Pistonlu motorlar havacılıkta yaygın olarak kullanılan diğer motor tiplerine kıyasla daha yüksek güç/ağırlık oranına sahip olmaları, alım ve işletim maliyetlerinin daha düşük olmaları gibi sebeplerden ötürü önemli avantajlara sahiptirler. Öte yandan turboşarj veya süperşarj gibi aşırı besleme ünitesine sahip olmayan atmosferik pistonlu motorlar ise önemli bir dezavantaj olarak deniz seviyesinden daha yüksek irtifalara çıkıldıkça maksimum motor güçlerini kaybetmeye başlarlar. Turboşarj veya süperşarj üniteleri sayesinde ise pistonlu motorlar yüksek irtifalarda atmosferik motorlara göre daha yüksek güç üretebilmektedirler.

Son yıllarda gelişen teknoloji sayesinde turboşarj ünitelerine sahip pistonlu motorların havacılık sektöründe de kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu tip motorlar kendilerine yalnızca sportif hava araçlarında değil, ayrıca gelişmiş insansız hava araçlarında da kullanım alanı bulmaktadırlar.

Bu çalışma kapsamında ise havacılıkta çok geniş kullanıma sahip Rotax-914 turbo beslemeli benzinli pistonlu motorun GT Power bir boyutlu analiz programı aracılığıyla motor modeli oluşturulmuş ve motor test sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca Rotax-914 motorunun üreticinin paylaştığı test verilerinden daha da yüksek irtifalarda da motorun performans parametreleri farklı sıcaklık ve motor hızı koşullarında incelenmiştir. Yakıt hava karışımının özgül yakıt tüketimi üzerine etkisi de ayrıca ele alınmış ve ortam koşullarına bağlı en verimli yakıt tüketimine sahip çalışma bölgesi gösterilmiştir. Bu sayede Rotax 914 motorunun konvansiyonel olarak kullanıldığı küçük sportif insanlı uçaklarda 14000 feet'e kadar irtifalar yerine insansız hava araçlarıyla birlikte 30000 feet'e kadar daha yüksek irtifalarda performans ve yakıt tüketimi parametreleri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İçten Yanmalı Motor, Pistonlu Motor, Havacılık motoru, Benzin, Turbo şarj, Turbo besleme, İrtifa, Güç, Özgül Yakıt Tüketimi, Performans, İHA

SUMMARY

Diesel or gasoline piston engines have been widely used in the aviation industry for many years. The most common engine type used especially in civil sports aircraft are piston engines.

Reciprocating engines have significant advantages compared to other engine types commonly used in aviation, due to their higher power-to-weight ratio, lower purchase and operating costs. On the other hand, atmospheric piston engines that do not have turbochargers or superchargers begin to lose their maximum engine power at higher altitudes than sea level, which is a significant disadvantage. Thanks to turbocharging or supercharging units, piston engines can produce higher power than atmospheric engines at high altitudes.

Thanks to the developing technology in recent years, the use of reciprocating engines with turbocharger units has also become widespread in the aviation industry. These types of engines find themselves in use not only in sportive aircraft, but also in advanced unmanned aerial vehicles.

Within the scope of this study, widely used engine model of the Rotax 914 turbocharged gasoline piston engine, was created by means of GT Power one-dimensional analysis program and compared with the engine test results. In addition, the performance parameters of the Rotax 914 engine at even higher altitudes than the test data shared by the manufacturer were investigated under different temperature and engine speed conditions. The effect of the fuel-air mixture on the specific fuel consumption at various engine speeds, altitudes and temperatures is also discussed and the operating region with the most efficient fuel consumption depending on the ambient conditions is shown. In this way, performance and fuel consumption parameters were investigated at higher altitudes up to 30000 feet with unmanned aerial vehicles, instead of at altitudes up to 14000 feet in small sportive manned aircrafts, where the Rotax 914 engine is conventionally used.

Keywords: Internal Combustion Engine, Piston Engine, Aviation engine, Gasoline, Turbocharger, Turbocharger, Altitude, Power, Specific Fuel Consumption, Performance, UAV

İÇİNDEKİLER**Sayfa**

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1.GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. PİSTONLU MOTORLAR.....	16
3.1 Çalışma Çevrimlerine Göre Pistonlu Motor Tipleri	16
3.1.1 Benzinli motorlar	16
3.1.2 Dizel motorlar	17
3.2 Zamanlarına Göre Motorlar	18
3.2.1 2 zamanlı motorlar	18
3.2.2 4 zamanlı motorlar	19
3.3 Geometrik Dizilim Tiplerine Göre Motorlar	20
3.4 Pistonlu Motorlarda Tork Ve Güç Üretimi.....	21
3.5 Pistonlu Motorlarda Aşırı Besleme Sistemleri	22
3.5.1 Süpersarj sistemleri	22
3.5.2 Turboşarj sistemleri.....	23
3.6 Giriş Havası Soğutucu Sistemleri	26

İÇİNDEKİLER (devam)**Sayfa**

3.7 Yakıt Hava Karışımı ve Stokiyometri	27
4. YÖNTEM	29
4.1 Motorun 1 Boyutlu Modelinin Hazırlanması.....	29
4.2 Motor Modelinin Doğrulanması	33
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
5.1 Deniz Seviyesinde Farklı Devirlerde Motor Performansı	42
5.2 Farklı İrtifalarda Motor Performansı	45
5.3 Standart Atmosfer Sıcaklığından Farklı Sıcaklıklarda Motor Performansı.....	50
5.4 Yakıt Hava Karışımına Bağlı Özgül Yakıt Tüketiminin Araştırılması	54
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	60
EK AÇIKLAMALAR	63
Ek Açıklama-A	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

3.1. Dizel ve benzinli motor çevrimlerine ait basınç-hacim değişim grafikleri	17
3.2. İki zamanlı motor çevrimi	18
3.3. Dört zamanlı motor çevrimi	19
3.4.a. Sıralı Tip Pistonlu Motor	20
3.4.b. Boksör Tip Pistonlu Motor	20
3.4.c. V Tip Pistonlu Motor	20
3.4.d. Yıldız Tip Pistonlu Motor	21
3.5. Süperşarj aşırı besleme ünitesi	22
3.6. Turboşarj aşırı besleme ünitesi	23
3.7. Turboşarj hava akış hattı ve tahliye kapağı	25
3.8. Örnek turboşarj kompresör haritası görseli	26
3.9. Çift turboşarj ünitesine sahip ara soğutuculu V tip bir pistonlu motor	27
4.1. Rotax 914 motorunun emme ve egzoz valflerinin kaldırma profilleri	31
4.2. GT Power Programında Oluşturulmuş 1 Boyutlu Rotax 914 Motor Modeli	34
4.3. Motor devrine bağlı güç verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması	35
4.4. Motor devrine bağlı manifold giriş basıncı verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması	35
4.5. Motor devrine bağlı yakıt debisi verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması....	36
4.6. Motor devrine bağlı λ verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması	37
4.7. Motor devrine bağlı Özgül Yakıt Tüketimi verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması	38
4.8. 5500 rpm’de, ISA0°C’de, irtifaya bağlı motor gücü verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması	39
4.9. 5500 rpm’de, ISA-10°C’de, irtifaya bağlı motor gücü verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması	39
4.10. 5500 rpm’de, ISA+20°C’de, irtifaya bağlı motor gücü verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması	40
5.1. Motor devrine bağlı motor torku ve kütleli hava debisinin değişimi	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

5.2. Motor devrine bağlı hacimsel verim değişimi	43
5.3. Motor devrine bağlı indike motor verimi değişimi	44
5.4. Deniz seviyesinde, ISA şartlarında, 3500 rpm'den 5800 rpm'e kadar motor devrine bağlı turboşarj kompresör çalışma bölgesi	45
5.5. Beş farklı motor devrinde irtifaya bağlı motor gücü değişimi	46
5.6. Altı farklı motor devrinde irtifaya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi	47
5.7. Altı farklı motor devrinde irtifaya bağlı kütleli hava debisi değişimi	47
5.8. 5500 rpm motor hızında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar turboşarj kompresör çalışma noktaları	48
5.9. Çeşitli motor hızlarında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar tahliye hattı açıklık miktarı	49
5.10. 5500 rpm motor hızında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar turboşarj türbin çalışma noktaları	50
5.11. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı motor gücü değişimi	51
5.12. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı kütleli hava debisi değişimi	51
5.13. Çeşitli motor hızlarında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar tahliye hattı açıklık miktarı	52
5.14. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı kütleli yakıt debisi değişimi	53
5.15. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi	53
5.16. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı giriş hava sıcaklığının değişimi	54
5.17. Standart atmosfer sıcaklığında, deniz seviyesinde, çeşitli motor devirlerinde λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi	55
5.18. 5500 rpm motor devrinde, standart atmosfer sıcaklığında, çeşitli irtifalarda λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi	56
5.19. 5500 rpm motor devrinde, deniz seviyesinde, çeşitli ortam sıcaklıklarında λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi	56

ÇİZELGELER DİZİNİ**Cizelge****Sayfa**

4.1.	Rotax 914 motorunun temel özellikleri	29
4.2.	Kullanılan yakıtın ve karbüratörün özellikleri	30
4.3.	Sürtünme fonksiyonu parametreleri	33
A.1.	Feet-Metre birim dönüşümü ve irtifaya bağlı ISA, atmosfer basıncı ve havanın yoğunluğu	63



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C	Sürtünme Basınç Katsayısı
D	Yanma uzunluğu
E	Wiebe kuvveti
F	Basınç katsayısı
g	Yerçekimi ivmesi
h	Saat (Hour)
H	Kütleli hava miktarı
P	Basınç (Pressure)
R	İdeal gaz sabiti
S	Hız (Speed)
T	Sıcaklık (Temperature)
V	Hacim (Volume)
Y	Kütleli yakıt miktarı
Z	Yükseklik

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar **Açıklama**

AA	Çapa Açısı (Anchor Angle)
BE	Yanma sonunda yakılan yakıt yüzdesel değeri (Burned End)
BEC	Yanma Bitiş Sabiti (Burned End Constant)
BM	Çapa açısında yakılan yakıt yüzdesel değeri (Burned Midpoint)
BMC	Yanma Orta Noktası Sabiti (Burned Midpoint Constant)
BS	Yanma başlangıcında yakılan yakıt yüzdesel değeri (Burned Start)
BSC	Yanma Başlangıç Sabiti (Burned Start Constant)
BSFC	Net Özgül Yakıt Tüketimi (Brake Specific Fuel Consumption)
BTDC	Üst Ölü Noktadan Önce (Before Top Dead Center)
CA	Krank Açısı (Crank Angle)
FAA	Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration)
FMEP	Ortalama Sürtünme Basıncı (Friction Mean Effective Pressure)
HALE	Yüksek İrtifa Uzun Süre Havada Kalış (High Altitude Long Endurance)
HP	Beygir Gücü (Horse Power)
ISA	Uluslararası Standart Atmosfer Şartları (International Standard Atmosphere)
İHA	İnsansız Hava Aracı
MPS	Ortalama Piston Hızı (Mean Piston Speed)
SMPS	Ortalama Piston Hızının Karekökü (Squared Mean Piston Speed)
MSL	Deniz Seviyesi (Mean Sea Level)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Kısaltmalar Açıklama**

PCP	Silindir İçi Maksimum Basınç (Peak Cylinder Pressure)
PS	Beygir Gücü (Pferde Stärke)
RON	Oktan Numarası (Research Octane Number)
RPM	Dakikadaki Motor Devri (Revolution Per Minute)
WS	Wiebe Sabiti
YBA	Yanmanın Başlama Açısı
YV	Yanma Verimi

1.GİRİŞ VE AMAÇ

Deniz seviyesine göre irtifa yükseldikçe standart atmosfer basıncının ve havanın yoğunluğunun düşmesine bağlı olarak havadaki oksijen konsantrasyonunun da düştüğü bilinmektedir. Yüksek irtifalarda insan fizyolojisi için havada yeterli miktarda oksijen bulunmamaktadır. Bir veya birkaç kişilik yolcu kapasitesine sahip hafif sınıf uçaklar ise sivil havacılıkta yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Bu tip uçaklarda genellikle kabin basıncı dengeleme sistemi bulunmamaktadır. Bu uçaklarda 14000 feet (feet metre dönüşümü için bkz. Ek Açıklama-A) irtifadan daha yüksek irtifalara çıkılması durumunda pilot ve yolcularda hipoksi olarak bilinen sağlık problemi gerçekleşir, oksijen yetmezliği durumu ilk önce insan beynini etkiler ve bilinç kapanır, dolayısıyla pilotlar bu durumda bir sağlık problemi yaşamaya başladıklarını da fark edemezler. Bu sebeple havacılık otoriteleri tarafından bu tip uçakların oksijen desteği olmadan uzun süre 14000 feet üzerine çıkması engellenmiştir. Ayrıca 12500 feet ile 14000 feet arasındaki irtifalarda da maksimum uçuş süresi 30 dakika ile sınırlandırılmıştır. Öte yandan oksijen desteği olmadan 10000 feet irtifadan daha yüksek irtifalara çıkılması önerilmemektedir. (FAA, 2020)

Cessna 172, Tecnam P2008 gibi küçük uçaklar kabin basıncı dengeleme sistemine sahip olmayan uçaklara örnek verilebilir. Bu insanlı uçaklar ve bu uçaklarda kullanılan Rotax 912 – Rotax 914 gibi motorlar 14000 feet irtifanın üzerindeki irtifalara hipoksi yaşanmaması amacıyla çıkmayacak şekilde tasarlanmış ve seçilmişlerdir. Ancak son yıllarda gelişen teknoloji ile insansız hava araçlarının (İHA) yaygınlaşmasıyla sivil ticari pazarda kullanılan bu tip uçak motorları İHALarda da kullanılmaya başlanmıştır. İnsansız uçuş gerçekleştiren hava araçlarında hipoksi sebebiyle irtifa limiti olmadığı için İHAlar 30000 feet ve daha yüksek irtifalarda uçabilmektedirler ancak Rotax 914 gibi motorlar bu amaç için tasarlanmamış olmaları sebebiyle üretici tarafından 16000 feet irtifaya kadar test verileri paylaşılmıştır, daha yüksek irtifalar için üretici tarafından test verileri paylaşılmamıştır. Ayrıca ülkemizde ve dünyada İHAlar için hava trafik kontrol iznine tabi olmak koşulu ile tavan irtifası kısıtlaması da mevcut değildir.

Bu çalışma kapsamında benzinli, tek kademe turboşarjlı, sıralı 4 silindirli, 1200cc hacimli Rotax-914 motoru ele alınmıştır. (Rotax, 2020) Gamma Technologies firmasının teknik bir çözümü olan 1 boyutlu içten yanmalı motor modelleme ve analiz programı GT-POWER kullanılarak Rotax-914 motoru modellenmiştir. Bu ve benzeri yazılımlar aracılığıyla içten yanmalı motorlar detaylıca modellenebilmektedir. Oluşturulan motor modeli üreticinin paylaştığı test sonuçlarıyla kıyaslanmış, kurulan modelin sonuçları testlerle doğrulanmış ve sapma miktarı gösterilmiştir. Çalışmanın devamında ise motorun test verileri mevcut olmayan 30000 feet irtifaya kadar yüksek irtifalarda performans parametreleri 1 boyutlu analizler sayesinde detaylıca incelenmiştir. Çeşitli motor devirlerinde, irtifalarda ve sıcaklıklarda yakıt hava karışımının özgül yakıt tüketimi üzerine etkisi de ayrıca ele alınmış ve ortam koşullarına bağlı en verimli yakıt tüketimine sahip çalışma bölgesi gösterilmiştir. Çalışmanın amacı ülkemizde ve dünyada kullanılan insanlı ve bilhassa insansız hava araçlarının yüksek irtifalarda yüksek performans ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için uygun motor seçimi ve seçilen motorun en verimli çalışma bölgesinin belirlenmesi süreçlerine ışık tutmaktır. Ayrıca bu çalışmanın yalnızca Rotax-914 motoru için değil, diğer benzer konfigürasyondaki benzinli motorların da yüksek irtifalarda yüksek performans kabiliyetlerinin ve yakıt tüketimi verilerinin araştırılması çalışmalarının tamamına yol göstermesi amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Mansouri ve Ommi'ye (2019) göre 1 boyutlu modelleme içten yanmalı motorların çeşitli uçuş koşulları altında çalışma ve performans karakteristiklerini incelemek için en kabul gören yöntemdir. 1 boyutlu modelleme ile filtre, karbüratör, hava emiş boğazı, valfler, silindir, piston, krank mili, egzoz, turboşarj gibi tüm motor bileşenlerini modellemenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Mansouri ve Ommi (2019) çalışmalarında Rotax-914 motoru benzinli, turboşarjlı bir hava aracı motorunu GT-POWER programında modellemişlerdir. Model analiz sonuçlarını gerçek uçuş koşullarındaki test sonuçlarıyla kıyaslamış ve doğrulamışlardır. Bu çalışma kapsamında önemli motor performans parametrelerini 30000 feet irtifaya kadar analiz etmişlerdir. Sonuçlarına göre 18000 feet irtifaya kadar motor gücünde önemli bir düşüş olmasa da 18000 feet irtifadan daha yüksek irtifalarda motor performansında dramatik bir düşüş mevcuttur. Bu durumun temel sebebinin turboşarj sisteminin kompresör ünitesinin boğulma rejimine girmesi ve hava debisini daha fazla arttıramaması olduğunu belirtmektedirler. Ortam sıcaklık değişiminin etkisini de incelemişlerdir. Tırmanma fazında ortam sıcaklığının 40°C yükselmesi sonucu motorun maksimum gücünde %10 düşüş gerçekleştiğini belirtmişlerdir. İrtifanın artmasıyla dış ortam sıcaklığının düştüğünü, Rotax-914 motorunun 30000 feet irtifada ISA-10 (uluslararası atmosfer sıcaklığı) sıcaklıkta dış ortam sıcaklığının -54°C olduğunu ve bu durumda karbüratörün donması ihtimaline dikkat edilmesi gerekliliğini vurgulamışlardır. Sıcak günlerde ise Rotax-914 motorunun emme boğazı giriş hava sıcaklık limiti 88°C olduğu için motorun tırmanış fazında bazı irtifalardaki çalışma koşullarının üretici tarafından ISA+20 veya ISA+30 sıcaklıklarla limitlenmek zorunda kaldığına değinmişlerdir. Ortam sıcaklığı ve irtifanın motor gücü üzerindeki etkilerinin farklı olduğu, irtifa değişiminin motor gücü üzerindeki etkisinin sıcaklık değişiminin etkisinden daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Rotax-914 motorunun en uygun tırmanma motor devrinin 5500 rpm (dakikadaki devir sayısı, revolution per minute) olduğundan bahsetmişlerdir. Onlara göre bu devirde yalnızca motor maksimum gücünü ve en iyi tırmanma performansını sağlamamaktadır, ayrıca çalışmalarında en düşük özgül yakıt tüketimini de yine bu motor devrinde elde etmişlerdir, çünkü tırmanış fazında 5500 rpm motor devrinde turboşarj sisteminin kompresör ünitesi

çalışma bölgesinin en uygun koşulunda çalıştığını tespit etmişlerdir. (Mansouri ve Ommi, 2019)

Yang vd.ne (2017) göre motor performansı silindir içine alınan temiz hava kütleel debisinin azalması sebebiyle yüksek irtifalarda önemli ölçüde düşmektedir. Motorun irtifada çalışma karakteristiğinin turboşarj sistemi, motor kalibrasyonu ve kirlilik seviyesi gibi birçok faktörden etkilendiğini ve turboşarj sisteminin bunların en önemlilerinden olduğunu belirtmişlerdir. İrtifada farklı turboşarj sistemlerinin özelliklerinin ve yeteneklerinin anlaşılmasının, irtifa adaptasyonu için motor performansının optimizasyonu açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır. Yang vd. (2017) motorun çalışmasının üç sınırına (maksimum silindir içi basınç, turboşarj hızı ve egzoz sıcaklığı) bağlı olarak testlerle doğrulanmış simülasyon yöntemi kullanmış ve turbo beslemeli dizel bir motorun irtifa adaptasyonunu incelemişlerdir. Yaygın olarak uygulanan üç tip turboşarj sistemini, bu kısıtlar ile sınırlandırılan operasyonel çalışma bölgesinde kıyaslamışlardır. Turboşarjlı bir dizel motorun irtifada çalışma bölgesinin silindir içi basınç, turboşarj hızı ve egzoz sıcaklığı limitleri ile sınırlı olduğunu belirtmektedirler. Motorun irtifa uyarlanabilirliği ve farklı irtifalarda turboşarj-motor eşleşmesine ilişkin değerlendirme yapabilmek için en uygun ve kullanışlı yöntemin motorun ve turboşarjın çalışma bölgelerini değerlendirmek olduğundan bahsetmişlerdir. Onlara göre türbin alanı motor çıkış gücü üzerinde 3 şekilde belirgin etkiye sahiptir. Daha geniş türbin alanının, silindir basıncı ve turboşarj hızı limitlerinde daha yüksek motor gücü sağladığını, ancak egzoz sıcaklığı limitinde ise daha düşük güç sağladığını tespit etmişlerdir. Turboşarjın verimliliğinin, türbin alanına kıyasla motor performansı üzerinde daha küçük ama tersi bir etkiye sahip olduğundan bahsetmektedirler. Motorun irtifa performansını yaygın olarak kullanılan üç tip turboşarj sistemi kullanarak kıyaslamışlardır. Değişken geometrili turboşarjın, incelenen tüm turboşarj sistemleri arasında en iyi irtifa uyarlanabilirliğine sahip olduğunu, bunu sırasıyla tahliye hattına sahip turboşarj ve sabit geometrili turboşarj sistemlerinin izlediği sonucunu elde etmişlerdir. Değişken geometrili turboşarj sisteminin üstün olmasının temel sebebinin türbin alanında ayarlama kabiliyeti ve daha yüksek turboşarj verimliliği olduğunu değerlendirmektedirler. Çalışmalarının sonuçlarına göre değişken geometrili turboşarj sistemine sahip motor 2200 rpm hızında iken 4,5 km irtifada deniz seviyesine oranla

yalnızca %9 güç kaybetmekte ve özgül yakıt tüketimi ise yalnızca %3,8 artmaktadır. (Yang vd., 2017)

Wang vd. (2013) yüksek irtifada çalışan iş makinalarının dizel motorlarının termal verimi üzerine rakımın etkisini detaylıca incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Düşük ve orta, yük ve hızlarda testler gerçekleştirmişlerdir. 0 m, 1600 m, 3300 m ve 4500 m olmak üzere dört rakımda motorun termal verimini incelemişlerdir. Dört çalışma koşulundaki sonuçların, irtifanın artmasıyla test motorunun termal veriminin tutarlı bir şekilde azaldığını gösterdiğinden bahsetmişlerdir. Motorun termal verimini düşürebilecek bazı potansiyel nedenleri de ayrıca analiz etmişlerdir. Wang vd.ne (2013) göre test motoru yüksek irtifada çalışırken yanmanın başlaması gecikmiş, genleşme oranı düşmüş, hava yakıt karışımının özgül ısı oranı azalmış, turboşarj sisteminin etkinliği azalmış, yakıt spreyinin deformasyonu ve ısı transferinin artmasının motorun termal verimliliğinin bozulmasına katkıda bulunduğunu açıkça ortaya koymuştur. Yüksek irtifada çalışan araçların motor hacimlerinin genel olarak deniz seviyesinde çalışan araçlarınkinden çok daha küçük olduğunu, buna rağmen bu araçların yıllarca görev yaptıktan sonra önemli ölçüde yakıt tüketimi ve toksik kirliliğe sebep olabileceğini değerlendirmişlerdir. Sürdürülebilir kalkınma için bu tip sorunlara çözüm bulmanın özellikle Çin, Hindistan, Brezilya ve Kolombiya gibi bol dağlık araziye sahip bazı gelişmekte olan ülkeler için hala çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek irtifada çalışan motorların tip onayı veya kullanımdaki uygunluğu için özel yasaların, motor üreticilerinin yüksek irtifa çalışma koşulları için ayar yapmaktan kaçınmasını önleyebileceğinden bahsetmişlerdir. Onlara göre oksijen eklenmiş yakıt farklı bir çözüm olabilir, oksijenli yakıttaki oksijen bileşenlerinin iyi kullanılmasıyla, yüksek irtifadaki oksijen kıtlığının sorun teşkil etmesi bir şekilde önlenebilir ve böylece yüksek irtifada çalışan motorların verimliliği artırılabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, yüksek irtifada çalışan motorların yanma ve emisyon özelliklerine ilişkin farklı enjeksiyon stratejileri ve alternatif yakıtlar üzerine yapılan çalışmaların büyük değer göreceğini değerlendirmektedirler. (Wang vd., 2013)

Luongo vd.ne (2006) göre simülasyonların incelenmesinden sonra, hem dört zamanlı hem de iki zamanlı motorlar için en uygun motor konfigürasyonu turboşarj ve dişli

kutusunda sahip motorlar gibi gözükmektedir; dahası turboşarj sistemlerinin, maksimum gücün sadece az bir ağırlık artışı ile belirli bir irtifaya kadar korunmasına izin verdiğini ifade etmektedirler. Luongo vd. (2006) çalışmalarında net özgül yakıt tüketimi (Brake Specific Fuel Consumption-BSFC) açısından dört zamanlı motorların, hem atmosferik hem de turboşarjlı konfigürasyonları için, doğrudan tahrik ile yaklaşık 229-230 gr/kWh ve şanzımanlı konfigürasyonlarında ise 225 gr/kWh'lık minimum değerlere ulaşabileceğinden bahsetmişlerdir. Ayrıca turboşarjlı ve dişli kutusuna sahip motorların, motorun kapladığı toplam hacim dikkate alındığında, doğrudan tahrikli atmosferik motorlara göre yaklaşık %40 daha düşük bir boyut elde edilmesini sağladığına değinmişlerdir. Son olarak, turboşarjlı iki zamanlı dişli kutusuna sahip motorların boyutlarının, doğrudan tahrikli dört zamanlı doğal emişli motorların boyutlarının yaklaşık % 57'si kadarı olduğunu ve bu durumun ümit verici bir çözüm olarak gözüktüğünü belirtmişlerdir. Onlara göre 2 zamanlı turboşarjlı ve dişli kutusuna sahip motorlarda minimum bsfc, dört zamanlı turboşarjlı dişli kutusuna sahip motorlara göre yaklaşık % 17-18 daha yüksektir. Bununla birlikte iki zamanlı motorların, bsfc söz konusu olduğunda daha iyi performansların elde edilebilmesini sağlayabileceğine değinmişlerdir. Bunun için turboşarj sistemlerinde daha fazla modifikasyon yapılması gerektiğini, ve egzoz ve emme portlarının zamanlamasını optimize ederek süpürme sürecini iyileştirmek için değişken geometriye sahip bir türbin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. (Luongo vd., 2006)

Miller vd. (2014) Rotax 914 uçak motoru için iki farklı ara soğutucu tasarlamış ve çeşitli büyüklüklerde kararsız hava akışı altında test etmiştir. Hava akışı kararsızlığını, motor hızlarını 1200 ile 6000 rpm arasında değiştirerek ve ara soğutucuyu motordan ayırarak kontrol etmişlerdir. Ara soğutucunun normal çalışma koşullarına benzer koşullarda testler yapmışlardır. Çalışmalarının sonuçları, hava akışı kararsızlığının ara soğutucu performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Daha yüksek motor hızlarına karşılık gelen daha düzenli akışların, ara soğutucunun çıkışlarında daha yüksek bir sıcaklık yayılmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Yüksek sıcaklık yayılmalarının motorun performansını olumsuz etkilediğinden bahsetmişlerdir. Çalışmalarında akış kararlılığı arttıkça her iki ara soğutucunun da sıcaklık yayılımının iki katından daha fazla arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarındaki ara soğutuculardan biri sıcaklık yayılmasını en aza indirmek için dahili bir akış şaşırtıcı sistemi ile tasarlanmış olsa

da, sıcaklık dağılımının hava akışının kararlılığından yine de önemli ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Ara soğutucuları ayrıca çeşitli akış kararlılık seviyelerinde durağan basınç düşüşü açısından da test etmişlerdir. Bu testin sonuçlarının ayrıca akış kararlılığı ile güçlü bir korelasyon gösterdiğini ifade etmişlerdir. Yüksek motor hızlarına karşılık gelen daha kararlı akışlarda ara soğutucu boyunca basınç düşüşünün, daha düşük motor hızlarında basınç düşüşünün üçte birine kadar daha az olduğu bulgusunu elde etmişlerdir. Ara soğutucudaki yüksek basınç düşüşünün, motorun performansının düşmesine sebep olduğundan bahsetmişlerdir. Akış kararlılığının ara soğutucuların etkinliği üzerindeki etkisini ölçmek için üçüncü bir test daha gerçekleştirmişlerdir. Bu testin sonuçlarının her bir ara soğutucu için farklı olduğunu, şaşırtmasız ara soğutucunun ölçülen tüm akış kararlılığı seviyelerinde sabit bir etkinliğe sahip olduğunu, akış şaşırtmalı ara soğutucunun motorla birlikte kullanıldığında verimlilikte %10'luk bir artış sağladığını, ancak motor hızından etkilenmediğini tespit etmişlerdir. Bu testlerin sonuçlarının, bu ara soğutucuların performansının büyük ölçüde motor hızına bağlı olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, ara soğutucular tasarlanırken ve test edilirken, ara soğutucuların kullanılacağı motor hızlarındaki aralığı hesaba katmanın öneminden bahsetmişlerdir. Sonuçlarına göre ara soğutuculardan hiçbiri, sıcaklığı 82°C'den 49°C'ye düşürme tasarım kriterlerini karşılayamamıştır. İstenilen sıcaklık düşüşünü elde etmek için, ısı eşanjörlerinin mevcut ısı eşanjörlerinin hacminin iki katından fazla olması gerektiğini belirtmişlerdir. (Miller vd., 2014)

Hashmi ve Radhakrishna (2015) çalışmaları kapsamında Rotax 914 motorunu Ricardo-Wave 1 boyutlu simülasyon programı kullanarak modellemiştir, bu modeli test sonuçlarıyla doğrulamış ve 30.000 feet irtifaya kadar simülasyon üzerinden performans parametrelerini incelemiştir. Doğrulama sonuçları, test sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermişlerdir. Sapma değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu ve dünya genelindeki benzer referans simülasyonlar ile eşit olduğunu belirtmişlerdir. Böyle doğrulanmış bir motor modelinin ayrıca valf zamanlaması, ateşleme zamanlaması, emme manifoldu, egzoz manifoldundaki modifikasyonlar gibi çeşitli tasarım kombinasyonlarının motor performansı üzerindeki etkilerini tahmin etmek ve motor tasarım değişikliklerine yön vermek için kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir. Mevcut durumda modeli, havacılık uygulamaları

için birincil öneme sahip olan yüksek irtifada motor performansını tahmin etmek için kullanmışlardır. Kalkış gücü, maksimum sürekli güç ve tüm motor hızlarında özgül yakıt tüketimi için simülasyon sonuçlarının, test sonuçlarıyla uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Onlara göre değerler kabul edilebilir aralıktadır ve model, temel performans parametreleri olan güç ve tork için de çeviklikle yanıt vermektedir. Krank açısına bağlı silindir içi basınç değerini 5800 rpm'de doğrulamışlardır. Çalışmalarındaki simüle edilmiş basınç eğrisi, test verisine benzer eğilimi takip etmektedir. Test ve simülasyon sonuçları arasındaki varyasyon %5,21 civarındadır. Bu oranın iyi bir eşleşme gibi görüldüğünü; ancak diğer doğrulanmış sonuçlarla karşılaştırıldığında biraz daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Daha yüksek varyasyonun, silindir içi basınç ölçüm tekniğinden kaynaklanabileceğinden bahsetmişlerdir. Referans motor silindir başına iki bujiye sahiptir ancak onların çalışmalarında silindir içi basınç ölçümü yapılırken basınç sensörü buji konumlarından birine yerleştirilmiştir. Onlara göre bu durum daha yüksek varyasyonunun sebebi olabilir. İrtifa yükseldikçe hava sıcaklığı düşmesine rağmen genellikle pistonlu motorların gücünün atmosfer basıncının düşmesi sebebiyle azaldığını belirtmişlerdir. Çalışmalarındaki simülasyon sonuçları da irtifa ile güç değişiminde benzer bir eğilim öngörmüştür, sırasıyla 3048 m (10000 ft), 6096 m (20000 ft) ve 9144 m (30000 ft) irtifalarda maksimum motor gücünde sırasıyla yaklaşık %5, %23 ve %48 düşüş öngörmüştür ve bu oranlar test sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Bir bütün olarak 1 boyutlu simülasyon modelinin, kabul edilebilir doğruluk seviyelerine sahip sonuçlar tahmin etmekte olduğunu ve potansiyel tasarım iyileştirmelerini denemek amacıyla bu sonuçlara güvenilebileceğini belirtmişlerdir. Onlara göre model, motor devrindeki değişikliklere iyi yanıt vermektedir ve aynı zamanda doğru eğilimi öngörmektedir. (Hashmi ve Radhakrishna, 2015)

Amiel ve Tartakovsky (2016) çalışmaları kapsamında Rotax 914 motorunu GT-Power 1 boyutlu simülasyon programı kullanarak modellemiş, modeli test sonuçlarıyla doğrulamış ve model aracılığıyla çeşitli yöntemlerle yüksek irtifalardaki vuruntu riskini azaltacak teknik çözümleri incelemişlerdir. Turboşarjlı bir benzinli uçak motorunda vuruntuyu önlemek amacıyla, kalkıştan önce veya uçuş sırasında, çeşitli ortam ve çalışma parametrelerinin ortak etkisini gerçek zamanlı olarak değerlendirerek vuruntu risk ve değerlendirmesi yapan yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Motor vuruntu davranışının, hava

platformlarının karşılaştığı çok çeşitli ortam koşullarında büyük ölçüde değişebildiğinden bahsetmişlerdir. Bilgisayar simülasyonlarının uçuş irtifası, kullanılan yakıtın oktan numarası, nem ve hava sıcaklığının, uçağın turboşarjlı motorunda vuruntu meydana gelmesi ihtimali ve sıklığı üzerindeki etkisini gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bu parametrelerin farklı olası kombinasyonlarının vuruntu ihtimali ve motor gücü üzerindeki etkilerinin, belirli bir motor hızında ve yükünde tek bir denklemde özetlenebileceğini belirtmişlerdir. Onlara göre bu tür denklemler vuruntu riskini değerlendirmek ve uçuş sırasında vuruntu limitine yaklaşıldığını anlamak için kullanılabilir. Amiel ve Tartakovsky (2016) bu çalışmalarında hava platformlarında olası kullanıma uygun, basitliği, düşük maliyeti ve düşük ağırlığı vurgulayan çeşitli vuruntu azaltma yöntemlerini seçmiş ve analiz etmişlerdir. Ara soğutucu ile silindir içine alınan havanın soğutulması yönteminin motorun çalışmasını düzenleyerek vuruntu ihtimalini düşürmede en iyi sonuçları gösterdiğinden ve aynı zamanda motor gücünün korunmasını, hatta iyileştirmesini de sağladığından bahsetmişlerdir. Ateşleme zamanlamasını geciktirmeyi ise maksimum motor gücünü düşüren bir çözüm olarak değerlendirmişlerdir. Ateşleme 3°CA rötara kaydırıldığında vuruntu yoğunluğunun yaklaşık %60 oranında azaldığını ancak motor gücünün 2 kW'dan daha az bir miktarda düştüğünü ifade etmişlerdir. Turboşarjlı motorlarda sabit giriş hava basıncı kontrolünün yaygın kullanımı sebebiyle silindir içine egzoz gazını geri sirküle etme yönteminin vuruntuyu azaltmanın ideal bir yolu haline gelemediğini, çünkü bu yöntemde motor gücünde önemli ölçüde kayıpların meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Silindir içine su enjeksiyonu yönteminin ise vuruntu riskini azaltma konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğunu ancak tek başına bir çözüm için yeterli olamayacağını değerlendirmişlerdir. Gelecekteki araştırmaların belirli bir platform için eksiksiz bir vuruntu yoğunluğu denklemleri seti oluşturması gerektiğini ve gerçek zamanlı uçuşlarda kullanılmak üzere uygulamayı içermesi gerektiğini belirtmişlerdir. Sürekli bir hava durumu tahmini güncellemesi yerine uygun denklemleri kullanarak vuruntu eğiliminin gerçek zamanlı hesaplamaları sayesinde vuruntu oluşumunu tetikleyebilecek belirli uçuş koşullarından kaçınılmasının sağlanabileceğini belirtmişlerdir. (Amiel ve Tartakovsky, 2016)

Carlucci vd. (2015) çalışmalarında farklı motor mimarilerini kıyaslamayı amaçlamışlardır. Bu mimariler ise tek kademe turboşarj, çift kademe turboşarj, tek kademe

turboşarja ilave bir süperşarj, elektrik destekli turboşarj ve bunların ara soğutuculu veya son soğutuculu motor konfigürasyonlarıdır. Çalışmalarına konu olan motorun çok yüksek irtifalarda ve uzun süreler çalışacak şekilde karakterize edildiğine değinmişlerdir. Bu nedenle AVL-Boost yazılımı ile motorun 1 boyutlu modelini oluşturmuşlardır. Çalışmalarına konu olan konfigürasyonları, genel havacılık ve İHA (İnsansız Hava Aracı) motoru olarak kullanılan 2 zamanlı bir dizel motorun aşırı besleme sistemi olarak modellemiş, motor gücü ve özgül yakıt tüketimi değerlerini ise temel performans parametreleri kabul ederek kıyaslamışlardır. Ayrıca, yakıt tüketimi açısından en iyi performans gösteren kontrol stratejilerini tanımlamak için elektrik destekli turboşarj sisteminin sıkıştırma oranının ara yüklerde elektrik destekli turboşarj tarafından üretilen veya harcanan güç üzerindeki etkisini de çalışma kapsamında analiz etmişlerdir. Çift kademeli turboşarj sistemiyle yaptıkları analizin, her irtifa için hedef güce ulaşmanın mümkün olduğunu gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, hava soğutucunun iki sıkıştırma aşamasından sonra konumlandırılmasının, özgül yakıt tüketimini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Tek bir turboşarj sisteminin mekanik bir kompresörle birlikte kullanıldığı mimarilere kıyasla çift kademeli turboşarj mimarisinin daha etkili olduğunu değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, konvansiyonel bir yüksek basınç turboşarj, elektrik destekli bir düşük basınç kompresörü ve türbinden oluşan bir hibrit süper şarj sistemini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, hibrit süperşarj mimarisinin çift kademeli turboşarj mimarisinden daha düşük bir yakıt tüketimi sağladığını ve tek kademeli turboşarj mimarisiyle ise benzer seviyelerde olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan hibrit mimarinin aynı zamanda tüm operasyon irtifaları için güç hedeflerine ulaşabildiğine de değinmişlerdir. Daha karmaşık, daha ağır ve daha yüksek hacimli olmasına rağmen, yakıt tüketiminde herhangi bir kayıp olmaksızın elektrik destekli turboşarj sisteminden güç çekilmesinin mümkün olduğunu tespit etmişlerdir. (Carlucci vd., 2015)

Li vd. (2015) çalışmalarında D6114 dizel motorunu GT-Power 1 boyutlu simülasyon programında modellemiş ve farklı irtifalarda güç üretimi için simülasyon araştırması gerçekleştirmişlerdir. Türbin enerjisi ile farklı irtifalarda gerekli kompresör gücü arasındaki farka dayalı olarak, eşleştirme sürecinde yeni bir turboşarj sistemi seçmişlerdir. Türbinin eşdeğer akış alanının görece küçük olması sayesinde farklı irtifalarda kompresör basıncı hedefine ulaşabildiğini tespit etmişlerdir. Farklı irtifalarda

motorun manifold basıncını sağlamak için türbin enerjisinin geniş bir aralıkta değişmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Baypas hattı akış hızındaki artışın, türbin akış karakteristiğini değiştirebileceğini ve türbin enerjisini önemli bir şekilde etkileyeceğini ifade etmişlerdir. Farklı irtifalarda simüle edilen 1 boyutlu simülasyon sonuçlarına göre, baypas vanasının kontrol stratejisinin baypas akış miktarına göre belirlendiğinden bahsetmişlerdir. Turboşarj sistemine dayalı olarak, genel sistem verimliliğindeki değişikliğin ve silindir içine temiz hava emme sürecindeki bozulmanın, farklı irtifalarda güç geri kazanımının temel sebeplerinden olduğunu tespit etmişlerdir. Egzoz basıncının geri kazanımı için valf kontrol stratejisi ile birlikte yakıt dengeleme yönteminin de farklı irtifalarda motorun gücünü geri kazanılabildiğini belirtmişlerdir. (Li vd., 2015)

Khodaparast vd. (2018) çalışmaları kapsamında 1597 cm^3 silindir hacmine sahip 4 zamanlı, sıralı 4 silindirli bir benzinli motoru GT-Power 1 boyutlu analiz programında modellemiş ve modeli motorun test sonuçlarıyla doğrulamışlardır. Ardından motoru 3 farklı çift kademe turbo besleme sistemi ile 1 boyutlu analiz programında modifiye etmiş ve yüksek irtifalarda motor gücünün azalmayacağı konfigürasyonu belirlemeyi hedeflemişlerdir. Çalışmalarında hava aracının bilhassa tırmanış fazında maksimum motor gücünü korumak için en uygun turboşarj kombinasyonunu seçmek amacıyla havacılıkta kullanılan pistonlu bir motor üzerinde parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. GT20-GT25-GT30 model olmak üzere 3 farklı turboşarj sisteminin 2li kombinasyonlarını boyutsal olarak simüle etmişler ve bu turboşarj sistemiyle konfigüre edilmiş motor güç grafiklerini çeşitli irtifalarda çizdirmişlerdir. En iyi performansa sahip olan turboşarj konfigürasyonunun GT20 turboşarjın yüksek basınçlı ve GT30 turboşarjın düşük basınçlı turboşarj olarak kullanıldığı kombinasyonun iki turboşarj arasındaki basınç oranının 0,6 kat olduğu konfigürasyon olduğunu tespit etmişlerdir. (Khodaparast vd., 2018)

Yang vd. (2017) motor performansının özellikle yüksek irtifalarda bozulduğundan ve düzenlenmiş çift kademeli turboşarj teknolojisinin, motor performansının geri kazanılması için mükemmel bir potansiyele sahip olduğundan bahsetmişlerdir. Farklı irtifalardaki çift kademeli turboşarj sisteminin karakteristiğinin anlaşılmasının, düzenleme mimarisinin optimizasyonu ve kontrol stratejisinin haritalanması açısından önemli

olduğuna değinmişlerdir. Yang vd. (2017) çalışmaları kapsamında yayla gibi yüksek rakımlı bölgelerde çalışan bir ağır hizmet dizel motorunda düzenlenmiş iki aşamalı bir turboşarj sisteminin özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle enerji analizi yaparak incelemişler ve üç ana sonuca ulaşmışlardır. Çift kademeli turboşarj sisteminde irtifa yükseldikçe turbo basma oranı artsa dahi beslenen mevcut akış enerjisinin kısmen arttığını ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, güç geri kazanımı için gereken enerji açığının irtifa ile önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, yüksek rakımlarda motorun güç geri kazanımı için egzozun mevcut akış enerjisinin iyileştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır. 2. Olarak yüksek basınç türbininin, turboşarj sistemine beslenen mevcut akış enerjisinin ayarlanmasında daha etkili olduğu sonucuna da ulaşmışlardır. Bunun nedenini ise yüksek basınç türbininin düşük basınç türbininden nispeten daha küçük eşdeğer akış alanına sahip olması ve yüksek basınç türbininin çift kademeli türbinin nominal etkin akış alanına çok daha büyük bir katkısının olması ile açıklamışlardır. 3. ve son olarak ise düşük ve yüksek basınç türbinlerinin irtifa değişimine tepkilerinin birbirinden farklı olması sebebiyle çift kademeli türbindeki enerji bölünmesinin, irtifa kazanımından derinden etkilendiği sonucuna ulaşmışlardır. Düşük basınç türbinindeki basma oranının, toplam basma oranı ile doğrusal olarak arttığını, yüksek basınç türbininin basma oranındaki artışın ise toplam basma oranı ile kademeli olarak artmaya devam etmediğini ve doyduğunu tespit etmişlerdir. Bu farklı davranışların, analitik model aracılığıyla sıralı olarak bağlanmış kısma valflerinin davranışından kaynaklandığının anlaşıldığını ifade etmişlerdir. Motor performansı için düzenlenmiş çift kademeli turboşarj sisteminin optimize edilmiş mimarisi ve kontrol stratejisinin, sonuçlarla aydınlatılabileceğini belirtmişlerdir. Akış enerjisinin ayarlanmasında ise iki türbinin farklı davranışları veya yeteneklerinden dolayı, içten yanmalı motorda düzenlenmiş çift kademeli turboşarj için iki ayarlanabilir türbin çözümünün önerilebileceğini, kontrol ve irtifa adaptasyonu için genel akış enerjisini ayarlarken ise yüksek basınç türbinine odaklanılması gerektiğini de belirtmişlerdir. Öte yandan düşük basınç türbininin kontrolünün de, turboşarj sisteminin genel performansının ve dolayısıyla motorun performansının optimizasyonu amacıyla enerji dağılımını optimize etmek için gerekli olduğunu ifade etmişlerdir. (Yang vd., 2017)

Perez ve Boehman (2009) çalışmaları kapsamında tek silindirli, doğal emişli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motor kullanarak, yüksek irtifa koşullarına

şartlandırılmış test ortamında emme havasının oksijenle zenginleştirilmesinin motor performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Simüle edilmiş irtifa koşulları altında bir dizel motorda oksijen zenginleştirme yöntemi kullanarak, değişken faktörler (yakıt enjeksiyon zamanlaması, motor yükü, simüle edilmiş irtifa ve oksijen hacmi oranı) ile güç, özgül yakıt tüketimi, yakıt verimi gibi motor performans parametreleri arasındaki ilişkileri belirlemeyi amaçlamışlardır. Değişken faktörlerin maksimum silindir içi basınç, maksimum yanma sıcaklığı ve maksimum ısı salınım hızı üzerindeki etkilerini de ayrıca değerlendirmişlerdir. Motor maksimum gücünün esas olarak motor yüküne bağlı olduğunu ve oksijenle zenginleştirilmiş hava kullanımıyla iyileştirilmediğini, ancak 2600 m'ye kadar olan irtifalarda önemli ölçüde azalmadığını, yani tavanı bu sınırın altında olan insansız hava araçlarının turboşarj sistemine ihtiyaç duymayacağını belirtmişlerdir. Yakıt enjeksiyon zamanlamasının, %55 oranında özgül yakıt tüketimini düşürdüğünü ve bu oranla en önemli faktör olduğunu, oksijen hacminde %22'lik zenginleştirme yapılmasına karşın özgül yakıt tüketimindeki düşüşün daha mütevazî bir şekilde %22 seviyesinde kaldığını tespit etmişlerdir. Oksijenle zenginleştirilmemiş havanın kullanımında irtifa yükseldikçe motorun özgül yakıt tüketiminin de yükseldiğini ancak oksijenle zenginleştirilmiş havanın kullanılması sayesinde, simüle edilmiş irtifa koşulları altında irtifa arttırılırken özgül yakıt tüketiminin yükselmesinin önlendiğini ifade etmişlerdir. Benzer sonuçların yakıt veriminde de meydana geldiğini, oksijenle zenginleştirilmiş hava kullanımının irtifa arttıkça yakıt veriminin düşmesini de önlediğini eklemişlerdir. Oksijen zenginleştirmenin, yüksek irtifalarda meydana gelen maksimum silindir içi basınçlarının düşüşünü hafifletmek için de etkili olduğuna değinmişlerdir. Oksijen hacmi oranı ne kadar yüksekse, sabit yükte maksimum silindir basıncındaki azalmanın da o kadar az olacağını belirtmişlerdir. En yüksek yanma sıcaklıklarının simüle edilmiş irtifanın yükselmesi ve oksijen hacim oranının düşmesinden önemli ölçüde etkilendiğini, ancak simüle edilmiş irtifanın artmasının etkisinin oksijen hacim oranının azalmasının etkisinden daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir. Bu deneylerde motor yükünün ve yakıt enjeksiyon zamanlamasının yanma sıcaklığı için önemli olmadığını belirtmişlerdir. Yakıtın yanmasından maksimum enerjiyi çıkarmak için, yakıt enjeksiyon zamanlamasının 8,4°C (krank açısı, Crank Angle) BTDC'nin (üst ölü noktadan önce, Before Top Dead Center) altına geciktirilmemesi gerektiğini ve motor yükünün de en az 0,22 MPa (% 50 gaz kolu) olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Simüle edilen irtifa 5200 m'ye çıktığında, tam yanma için yeterli oksijenin bulunmaması nedeniyle maksimum ısı yayma oranının azaldığından

bahsetmişlerdir. Artan irtifa ile maksimum ısı yayma oranındaki artışın eğiminin, oksijen konsantrasyonu arttıkça daha dik bir eğime sahip olduğunu; bu durumun, maksimum silindir içi basınç ve yanma sıcaklıklarındaki artışla tutarlı olduğunu belirtmişlerdir. (Perez ve Boehman, 2009)

Wilkinson ve Benway (1991) çalışmalarında bir sıvı soğutmalı turboşarjlı benzinli itki sisteminin, diğer motor çevrimlerine kıyasla, özgül yakıt tüketimi, özgül hava tüketimi, termal kayıplar ve düşük güç modülasyonu anlamında HALE sınıfı (High Altitude Long Endurance), yüksek irtifa uzun süre havada kalış) bir insansız hava aracı için en uygun seçenek olduğunu belirtmişlerdir. Yakıt verimliliği ve güvenilirlik konularında benzinli sıvı soğutmalı motorların, Voyager ve Condor uçaklarında kırdıkları dünya rekorlarıyla kendilerini kanıtladıklarına değinmişlerdir. Hem hafif hem de verimli olan turboşarj sistemlerinin, bir içten yanmalı itki sistemini 100000 feet irtifaya kadar verimli bir şekilde çalışmasını sağlayabildiğini ifade etmişlerdir. İyi tasarlanmış ve motora uygun seçilmiş turboşarj sistemlerinin yüksek türbin giriş sıcaklıkları sayesinde, yüksek irtifalarda da güç türbininin egzoz gazında mevcut olan enerjiyi yeniden kullanmasına imkan tanıdığından bahsetmişlerdir. Turbo beslemeli, sıvı soğutmalı, benzinli bir HALE sınıfı İHA motorunun 5,0 lb/hp.h'in altındaki bir özgül hava tüketimine ve % 50'lik bir termal verime yaklaşabildiğini belirtmişlerdir. (Wilkinson ve Benway, 1991)

Emekli ve Özgül (2014) çalışmaları kapsamında, çift kademeli turboşarj sistemine sahip bir dizel motorun, motor kontrolü uygulamalarında kullanılabilecekleri bir modelini oluşturmuşlar ve gerçek zamanlı motor verisi ile doğrulamışlardır. Motor modelini, 1 boyutlu gaz dinamiği prensibine göre bilgisayar ortamında, RICARDO WAVE paket programı kullanılarak oluşturmuşlardır. Ardından, uygun MATLAB/SIMULINK bağlantıları kullanarak RICARDO WAVE paket programındaki WAVE RT aracı ile gerçek zamanlı modeli yaratmışlardır. Bilgisayar ortamında meydana getirilen gerçek zamanlı modeli doğrulamak için motor dinamometresinde gerçek zamanlı sürekli rejim ve geçici rejim testleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan benzetimlerde sürekli rejim ve geçici rejimdeki model sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğunu ve genel olarak bağıl hatanın %10 seviyesinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Kompresör ve türbin modellerinin

hassasiyetinin düşük hava debisinin olduğu bölgelerde azaldığını; ancak o bölgelerin motor kontrol uygulamalarında kullanılmaması nedeniyle modelin genel hassasiyetine etkisinin fazla olmadığını belirtmişlerdir. (Emekli ve Özgöl, 2014)



3. PİSTONLU MOTORLAR

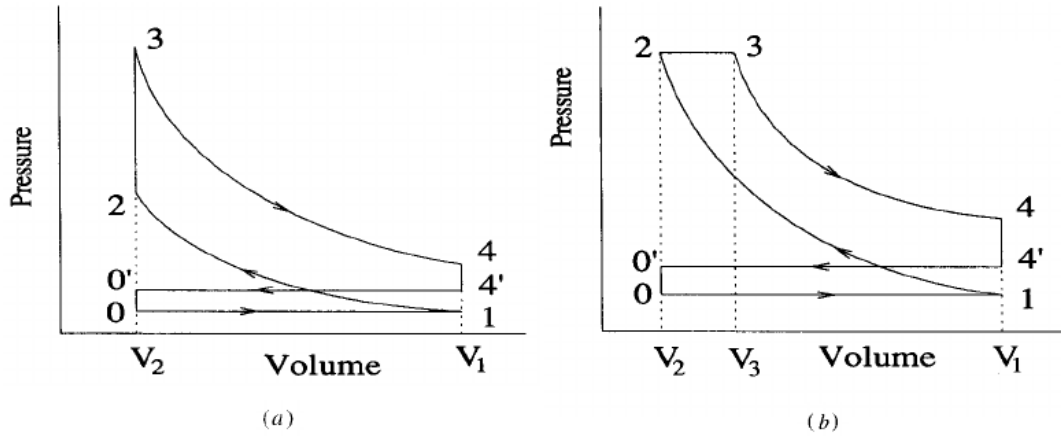
Pistonlu motorlar birçok sektörde çok yaygın kullanım alanına sahip olduğu gibi havacılıkta da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellikle hafif ve ultra-hafif sınıfta sportif hava araçlarında pistonlu motorlar çok geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Son 10-20 yılda ise gelişen teknolojilerle birlikte pistonlu motorların teknik üstünlükleri de artmış ve bu sebeple hava araçlarında kullanımı daha da yaygınlaşmıştır. Bu teknik üstünlüklerden en önemlileri yüksek güç/ağırlık oranı, düşük özgül yakıt tüketimi, düşük yüzey alanı, uzun kullanım ömrü, uzun bakım aralığı ve yüksek güvenilirlik olarak sayılabilir.

Havacılıkta hem benzinli hem de dizel pistonlu motorlar geniş kullanım alanına sahiptir. Yalnızca hafif veya ultra-hafif sınıf hava araçlarında değil, ayrıca bazı gelişmiş insansız hava araçlarında da pistonlu motorlar kullanılmaktadır. Bu motorların büyük çoğunluğu 4 zamanlı çalışma prensibine sahip iken, bazı küçük sınıf insansız hava araçlarında 2 zamanlı benzinli motorlar da kullanılabilmektedir. Bu durumun temel sebebi 2 zamanlı motorların 4 zamanlı motorlara göre nispeten daha az karmaşık olması ve bu sayede maliyet avantajları sunmasıdır.

3.1 Çalışma Çevrimlerine Göre Pistonlu Motor Tipleri

3.1.1 Benzinli motorlar

Benzinli motorlar Otto termodinamik çevrimini esas alan motor tipleridir. Kıvılcım ateşlemeli olarak da anılan benzinli motorlarda silindir içerisine yakıt hava karışımı alınır ve bu karışım ateşleme bujisi yardımıyla bir anda tutuşturulur ve yanma başlar. Buji bir anda kıvılcım üretebildiği için teorik olarak yanma esnasında silindir içi hacim sabit kabul edilir. Her çevrimde buji kıvılcım üretmekte ve yakıt hava karışımının yanmasını başlatmaktadır. Şekil 3.1 (a) 'da Otto çevrimi'ne ait basınç hacim değişimi grafiği gösterilmiştir.



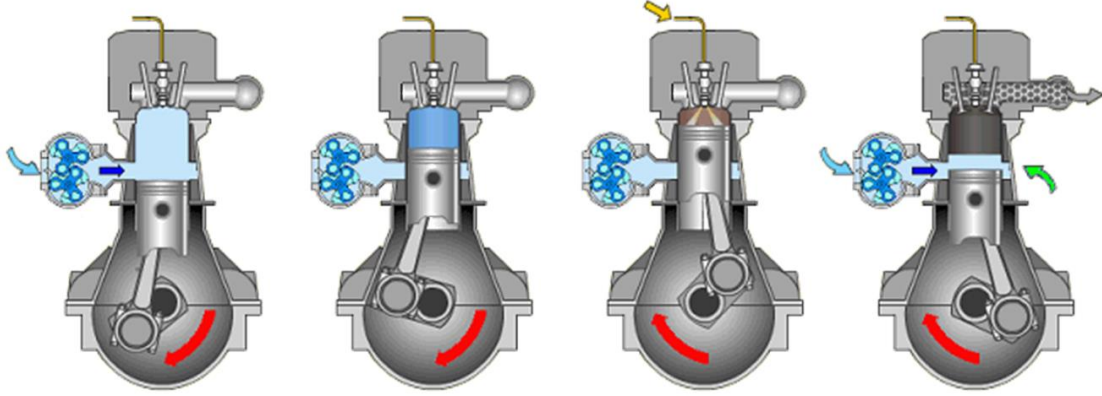
Şekil 3.1. Dizel ve benzinli motor çevrimlerine ait basınç-hacim değişim grafikleri (Hernandez, 1999)

3.1.2 Dizel motorlar

Dizel motorlar ise Dizel termodinamik çevrimini esas alan motor tipleridir. Silindir içerisine temiz hava alınır ve sıkıştırılır. Bu sıkıştırılmış basınçlı havanın üzerine yüksek basınçlı yakıt pülverize halde püskürtülür ve yanma başlar. Yanma enjeksiyon süresi boyunca devam eder, bu sebeple yanma esnasında dizel motorlarda hacim değişiminin gerçekleştiği P-V diyagramında da gösterilmektedir. Bazı dizel motorlarda buji bulunsa da bu buji kızdırma bujisidir ve soğuk havalarda silindir içinde yanmanın başlayabilmesi için silindir içini ısıtmak amacıyla kullanılır. Şekil 3.1 (b) 'de Dizel çevrimi' ne ait basınç hacim değişimi grafiği gösterilmiştir.

3.2 Zamanlarına Göre Motorlar

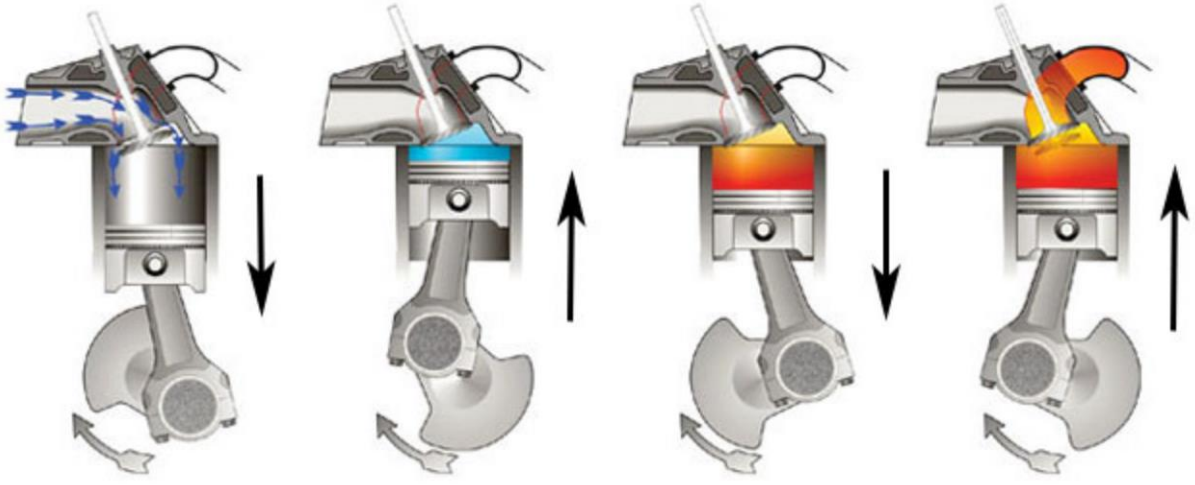
3.2.1 2 zamanlı motorlar



Şekil 3.2. İki zamanlı motor çevrimi (Anonim, 1998)

2 zamanlı motorlar bir çevrimi krank milinin 1 tur dönmesiyle tamamlarlar. Bu çevrim benzinli motor örneği ele alınarak Şekil 3.2’de de gösterilmiştir ve sırasıyla, temiz havanın emme portundan emilmesi ve yakıt ile karışması, silindir içerisinde pistonun alt ölü noktadan üst ölü noktaya hareketi ile sıkıştırılması, bujinin ateşlenmesiyle(benzinli motorlarda) silindir içerisinde yanmanın gerçekleşmesi, bu yanma sonucu oluşan silindir içi yüksek basınç sebebiyle ise pistonun alt ölü noktaya hareket etmesi ve bu esnada güç üretilmesi, yanmış yakıt hava karışımının egzozdan atmosfere tahliye edilmesi gerçekleşir. 2 zamanlı motorlarda valfler yoktur, portlar vardır. Bu portlar piston hareketine göre sırayla açılıp kapanırlar ve bu sayede karter ile silindir arasında yanmamış veya yanmış hava yakıt karışımı süpürülerek transfer olur. 2 zamanlı motorlarda kapalı çevrim bir yağlama sistemi olmadığından yakıtta belirli bir oranda yağ karıştırılır ve bu yağ da silindir içinde yakılır. Bu yağlama oranı genellikle hacimsel olarak 1:40 – 1:50 aralığındadır.

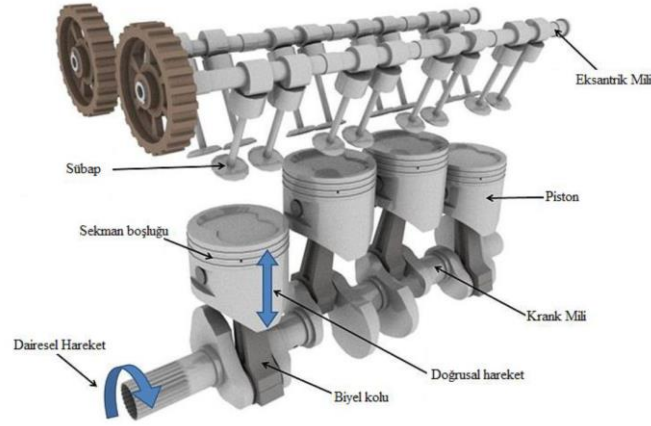
3.2.2 4 zamanlı motorlar



Şekil 3.3. Dört zamanlı motor çevrimi (Anonim, 2015)

4 zamanlı motorlar ise bir çevrimi krank milinin 2 tur dönmesiyle tamamlarlar. Bu çevrim benzinli motor örneği ele alınarak Şekil 3.3’de de gösterilmiştir ve sırasıyla, temiz havanın emme valfinden emilmesi ve yakıt ile karışması, silindir içerisinde pistonun alt ölü noktadan üst ölü noktaya hareketi ile sıkıştırılması, bujinin ateşlenmesiyle silindir içerisinde yanmanın gerçekleşmesi, bu yanma sonucu oluşan silindir içi yüksek basınç sebebiyle pistonun alt ölü noktaya hareket etmesi ve bu esnada güç üretilmesi, pistonun ve krankın ataleti ile yeniden üst ölü noktaya hareketi ve bu esnada egzoz valfinin açılmasıyla yanmış yakıt hava karışımının atmosfere tahliye edilmesi sırasıyla gerçekleşir. 4 zamanlı motorlarda portlar yoktur emme ve egzoz valfleri vardır. Bu valfler genellikle krank milinden tahriklenen bir kam mili aracılığıyla açılır ve kapanırlar, bu sayede silindir içerisine temiz havanın alınmasını ve yanmış gazların da silindirden atmosfere egzoz hattından tahliye edilmesini sağlarlar. 1 çevrim boyunca krank mili 2 tur, mili ise 1 tur döner.

3.3 Geometrik Dizilim Tiplerine Göre Motorlar



Şekil 3.4.a. Sıralı Tip Pistonlu Motor (Çelik, 2021)



Şekil 3.4.b. Boksör Tip Pistonlu Motor (Çelik, 2021)



Şekil 3.4.c. V Tip Pistonlu Motor (Çelik, 2021)



Şekil 3.4.d. Yıldız Tip Pistonlu Motor (Çelik, 2021)

Pistonlu motorlar 1 veya 1’den fazla silindir sayılarına sahip olabilmektedir. Bu çeşitli sayıda silindirler ise yine çeşitli dizilimlerde tasarlanabilmektedir. Bu silindir dizilimlerinden bazıları sıralı motor, boksör motor, v motor ve yıldız motordur. Şekil 3.4.a’da sıralı tip pistonlu motor, Şekil 3.4.b’de boksör tip pistonlu motor, Şekil 3.4.c’de v tipi pistonlu motor ve Şekil 3.4.d’de ise yıldız tip pistonlu motor gösterilmiştir. Bu dizilim tiplerinin birbirlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Motor ve hava aracı platform üreticileri kendi görev profillerine en uygun dizilimde motoru seçmektedir. Bu çalışma kapsamında sıralı 4 silindirli bir pistonlu motor ele alınacaktır.

3.4 Pistonlu Motorlarda Tork Ve Güç Üretimi

Silindir içi yanma sonucu oluşan silindir içi yüksek basınçlar sayesinde piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya hareket eder. Bu esnada pistonun doğrusal hareketi biyel kolu aracılığıyla krank miline iletilir ve krank mili dairesel olarak hareket eder. Krank milinin üzerinden aktarma organları aracılığıyla platforma hareket kazandıran bu dönme kuvveti’ne tork denir, birimi Nm’dir. Motor gücünü ise kabaca tork’un motor devri ile çarpılması ve birim dönüşümü yapılması olarak tanımlayabiliriz. Birimi HP (Horse Power)

veya Watt'dır. Motor gücü ve tork arasında aşağıdaki gibi bir ilişki mevcuttur (Heywood, 1988);

$$Güç(kW) = \frac{Tork(Nm)MotorHızı(rpm)}{9,5488} \quad (3.1)$$

3.5 Pistonlu Motorlarda Aşırı Besleme Sistemleri

Deniz seviyesinde atmosfer basıncı 1 atm yani 101,325 kPa'dır. İrtifa yükseldikçe atmosfer basıncı da düşmektedir. Atmosfer basıncının düşmesiyle havanın yoğunluğu ve havadaki oksijen konsantrasyonu da azalmaktadır. Bu durum havada birim hacimdeki kütleli oksijen miktarının azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple atmosferik motorlar deniz seviyesinde silindir içlerine kütleli olarak daha fazla oksijen alabilirlerken, irtifa arttıkça silindir içine alınan oksijen miktarı da azalmaktadır. Yüksek irtifada atmosferik motorlar güçlerini kaybetmektedir. Bu problem içten yanmalı motorlara aşırı besleme ünitelerinin eklenmesi ihtiyacını doğurmuştur. Yaygın olarak 2 temel aşırı besleme ünitesi mevcuttur. Bunlar turboşarj ve süperşarj üniteleridir.

3.5.1 Süperşarj sistemleri



Şekil 3.5. Süperşarj aşırı besleme ünitesi (Anonim, 2021)

Süperşarj üniteleri Şekil 3.5’de de gösterildiği gibi krank milinden genellikle bir kayış vasıtasıyla tahriklenirler. Bu dairesel kuvvet süperşarj sisteminin kompresör ünitesine iletilir ve kompresör ünitesi yüksek hızlarda dönmeye başlar. Kompresör ünitesinin kanatçıkları yüksek hızda dairesel hareket ile taze havayı sıkıştırarak emme manifoldundan silindirlere gönderir. Silindir içine daha fazla hava alındığı için daha fazla yakıt yakılabilir, silindir içi basınçlar artar ve daha fazla güç üretilir ancak süperşarj ünitelerinin en büyük dezavantajı krank milinden tahriklendikleri için motor gücünün bir kısmını tüketmeleri ve motorun verimini düşürmeleridir.

3.5.2 Turboşarj sistemleri

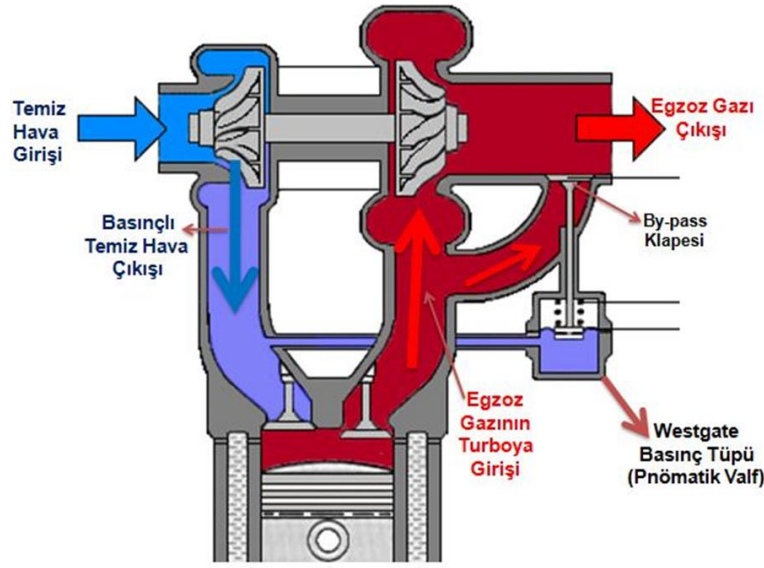


Şekil 3.6. Turboşarj aşırı besleme ünitesi (Anonim, 2021)

Turboşarj üniteleri ise Şekil 3.6’da da gösterildiği gibi süperşarj ünitelerine benzer olarak kompresör ünitesine sahiptir ve bu sayede dışarıdan alınan taze hava sıkıştırılarak emme manifoldundan silindirlere gönderilir. Silindir içine daha fazla hava alındığı için daha fazla yakıt yakılabilir, silindir içi basınçlar artar ve daha fazla güç üretilir. Turboşarj ünitesinin süperşarj ünitesinden farkı ise kompresörün krank milinden tahriklenmesi yerine egzoz gazının enerjisini kullanarak tahriklenmesidir. Egzoz hattı üzerine konumlu bir türbin ünitesi mevcuttur. Yüksek enerjili egzoz gazı atmosfere atılmadan önce turboşarj ünitesinin türbin kanatçıkları üzerinden geçerek türbini enerjilendirmiş ve döndürmüş olur.

Türbin bir mil ile kompresöre mekanik olarak bağlıdır. Bu dairesel hareket türbin mili aracılığıyla kompresöre iletilir ve bu sayede silindir içine girecek hava atmosfere atılacak, yani kaybedilecek olan egzoz gazı enerjisi kullanılarak sıkıştırılmış olur. Bu sebeple turboşarj sistemleri pistonlu motorların verimlerini yükseltmektedirler. Ancak turboşarj üniteleri düşük motor devirlerinde egzoz gazının enerjisi yeterli olmadığı için havayı yeterince sıkıştıramamaktadırlar. Bu sebeple motor hızı düşük devirlerden yüksek devirlere çıkarken belirli bir hızdan sonra turboşarj türbin ünitesi enerjilenir ve silindir içine alınan hava kompresör tarafından sıkıştırılmaya başlar. Türbinin enerjilenmeye başlamasına ve kompresörün havayı sıkıştırmaya başlamasına kadar bir süre geçer. Bu geçen süreye turbo gecikmesi denir. Turbo gecikmesi ardından motorun torku ve dolayısıyla gücü birden ani bir artış gösterir. Bu durumlar otomobil gibi kara araçlarında şoförlerin sürüş dinamiklerini etkilese de insansız hava araçlarının otonom uçuş kontrol bilgisayarları açısından herhangi bir problem oluşturmamaktadır. Ayrıca turboşarj sistemlerde turbo gecikmesi ve tork patlamasını önlemeye yönelik değişken geometrili turboşarj veya çift yollu gibi turboşarj gibi sistemler de bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında da turboşarj sistemiyle aşırı beslemeli benzinli bir motor üzerinde çalışılmaktadır.

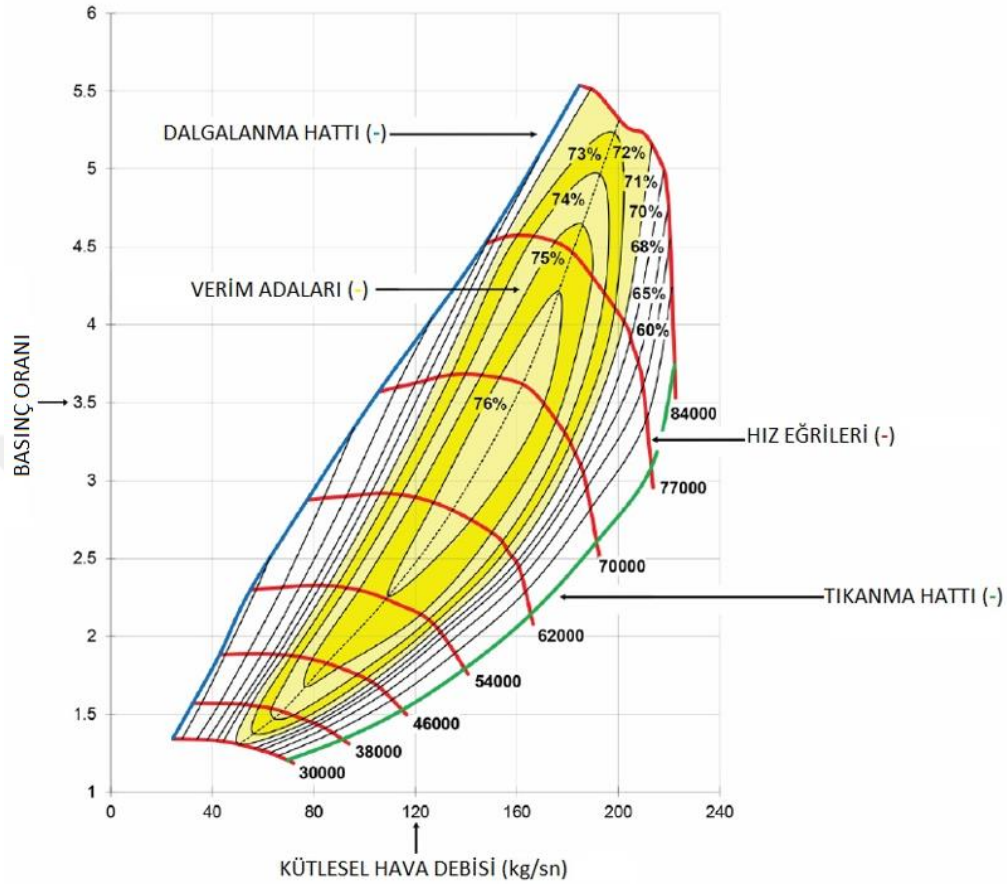
Turboşarj üniteleri egzoz hattından geçen egzoz gazının enerjisinden tahriklenirken kimi durumlarda türbinin daha yüksek devirde dönmesi istenmez. Bu, turboşarj ünitesinin mekanik dayanımı için belirlenmiş olan üst turboşarj devir limiti ya da kullanıcının gaz kolu pozisyonu düşürerek motordan o andaki güç isterinin azalması sebebiyle olabilir. Her iki durumda da egzoz gazının türbin kanatçıkları üzerinden geçmesini önlemek amacıyla kullanılan bir tahliye hattı mevcuttur. Bu tahliye hattı, içten yanmalı motorlar endüstrisinde bilinen ismiyle tahliye kapağı(wastegate) açılır ve egzoz gazının bu hattan geçerek atmosfere atılması sağlanır. Günümüzde kullanılan güncel tahliye kapakları elektronik kontrollü hidrolik-pnömatik veya elektronik kontrollü elektromekanik sistemler olabilmektedirler. Şekil 3.7’de turboşarj hava akış hattı ve tahliye kapağı gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Turboşarj hava akış hattı ve tahliye kapağı (Anonim, 2018)

Turboşarj sistemlerinin çalışma bölgeleri kompresör ve türbin haritalarıyla gösterilmektedir. Turboşarj üreticileri tarafından motor üreticileriyle paylaşılan bu haritalar, ilgili pistonlu motor için uygun turboşarj sistemlerinin seçilmesinde kritik öneme sahiptir ve motor performans parametreleri üzerinde direkt etkiye sahiptir. Şekil 3.8'de örnek bir kompresör haritası gösterilmiştir. Bu haritada x eksenini kütleli hava debisini, y eksenini ise kompresörün basma oranını gösterir. İlgili pistonlu motor belirli irtifa ve sıcaklık koşulları altında, yük ve motor hızında iken bu haritada belirli bir kütleli hava debisi ve basma oranına sahiptir. Bu nokta aynı zamanda turboşarj sisteminin o anda kaç devirde döndüğünü ve kompresör verimini de belirtir. En yüksek kırmızı renkli çizgi turboşarj sisteminin aşırı hızlanma limitidir. Yeşil renkli çizgi kompresörün tıkanma hattıdır, turboşarj sistemi bu hatta yaklaşır ancak tıkanır ve bu hattı geçemez, verim kaybeder, bu sebeple tıkanma hattından uzakta yüksek verim bölgesinde çalışması istenir, buna göre turboşarj sistemi seçilir. Mavi ile gösterilen en soldaki çizgi ise dalgalanma hattıdır ve bu hat turboşarj sistemi için tehlikeli bölgeyi işaret eder. Bu hat üzerinde kompresör basma oranı yüksek olmasına rağmen bunun için yeterli kütleli hava debisi mevcut değildir. Turboşarj bu hatta geldiğinde hızında ve kütleli hava debisinde salınımlar başlar, bu salınımlar devam ederse mekanik hasarlara sebep olabilir. Bu sebeple ilgili pistonlu motor için dalgalanma hattından yeterince uzak bölgede yüksek verimle çalışacak kompresör ünitesi seçilmelidir. Kütleli hava debisi ve kompresör hızı genellikle kompresör haritalarında düzeltilmiş veya indirgenmiş olarak verilir. Bunun sebebi turbo testlerinde

mevcut olan basınç ve sıcaklık şartları ile turboşarjın çalıştığı diğer şartlardaki verileri birbirleriyle kıyaslayabilmektir.

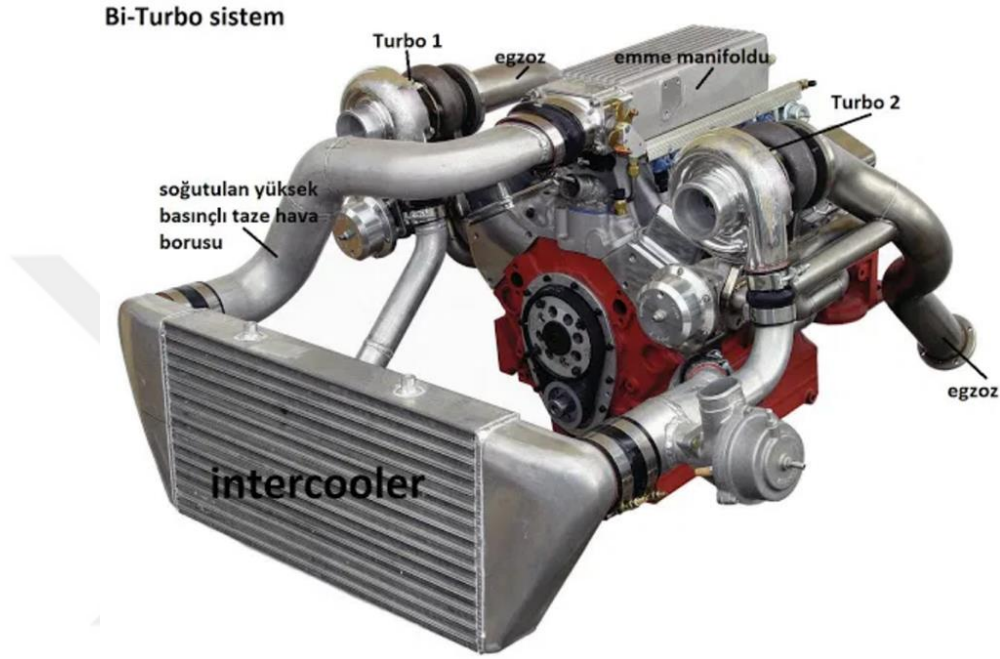


Şekil 3.8. Örnek turboşarj kompresör haritası görseli (Garrett, 2019)

3.6 Giriş Hava Soğutucu Sistemleri

Her ne kadar ara soğutucu sistemler aşırı besleme sistemlerinden biri olmasa da ara soğutucular aşırı besleme sistemleriyle birlikte kullanılırlar. Aşırı besleme yöntemleriyle sıkıştırılan hava ısınmaktadır. Silindir içine alınan havanın bir limit sıcaklık değerinin altında kalması gerekir, aksi halde silindir içerisinde vuruntulu yanma meydana gelir. Ayrıca ısınan havanın öz kütlesi düştüğü için silindir içersine kütle olarak daha az oksijen alınmış olur, bu da motorun maksimum gücünün düşmesine yol açar. Bu problemi önlemek için ara soğutucu(intercooler) denilen ısı değiştirici üniteleri kullanılmakta ve sıkıştırılmış hava emme manifoldundan silindir içine girmeden önce soğutulur. Hava ara soğutucu ünitesinden geçerken bir miktar basınç kaybı gerçekleşmektedir ancak yine de hava yüksek sıkıştırma oranlarında sıkıştırıldığı ve ardından soğutulduğu için motorun

maksimum gücü arttırılmış olur. Kimi motorlarda bir veya birden fazla ara soğutucusu mevcut iken kimi motorlarda da ağırlık ve maliyet düşürmek amaçlı ara soğutucu bulunmaz. Şekil 3.9'da çift turboşarj ünitesine sahip ara soğutuculu V tip bir pistonlu motor gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Çift turboşarj ünitesine sahip ara soğutuculu V tip bir pistonlu motor (Sekiz Silindir, 2016)

3.7 Yakıt Hava Karışımı ve Stokiyometri

Pistonlu motorlarda silindir içine alınan yakıt hava karışımının kompozisyonu özellikle benzinli motorlarda motor performansı ve yakıt tüketimi üzerinde kritik öneme sahiptir. Bir gram benzini yakabilmek için gerekli olan kütleli hava miktarı 14,7 gram'dır. Bu 1:14,7 oranına benzinin ideal stokiyometrik oranı denir. Silindir içine giren yakıt hava karışımında stokiyometrik orandan daha fazla yakıt bulunuyorsa zengin karışım, daha az yakıt bulunuyor ise fakir karışım olarak adlandırılır. Ayrıca motorun sahip olduğu yakıt hava karışımının ideal stokiyometrik yakıt hava karışımına oranı ise λ ile gösterilir. λ 1'den küçük olduğu durumlarda zengin karışımı, 1'e eşit olduğunda ideal stokiyometrik karışımı, 1'den büyük olduğunda ise fakir karışımı ifade eder. (Heywood, 1988)

$$\lambda = \frac{(H / Y)_{gerçek}}{(H / Y)_{stokiyometrik}} \quad (3.2)$$

H gram cinsinden kütleel hava miktarını, Y ise gram cinsinden kütleel yakıt miktarını ifade etmektedir.

4. YÖNTEM

4.1 Motorun 1 Boyutlu Modelinin Hazırlanması

Rotax-914 motoru tek kademe turboşarj sistemine sahip bir benzinli havacılık motorudur. Deniz seviyesinde 5800 rpm'de 5 dakika boyunca 115 HP maksimum güç üretirken, sürekli maksimum gücünü 5500 rpm'de üretmektedir. Motorun temel özellikleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur. (BRP Powertrain ROTAX, 2010)

Çizelge 4.1. Rotax 914 motorunun temel özellikleri (BRP Powertrain ROTAX, 2010)

Parametre	Değer
Motor hacmi	1200 cc
Silindir sayısı	4
Silindir konfigürasyonu	Boksör
Sıkıştırma oranı	1:9
Valf sayısı	8
Kuru ağırlık	71,5 kg
Strok	61 mm
Silindir çapı	79,5 mm
Maksimum güç	115 HP (5800 rpm'de)
Maksimum tork	144 Nm (4900 rpm'de)
Turboşarj Sistemi	Garrett T-25

GT-Power programında Rotax-914 motorunu modellemek için giriş hava manifoldu, silindirler, pistonlar, egzoz manifoldları, valfler, krank mili ve turboşarj ünitesi ayrı ayrı modellenmiş ve özellikleri de ayrıca tanımlanmıştır. Tüm bu bileşenler birleştirilerek nihai motor modeli oluşturulmuştur.

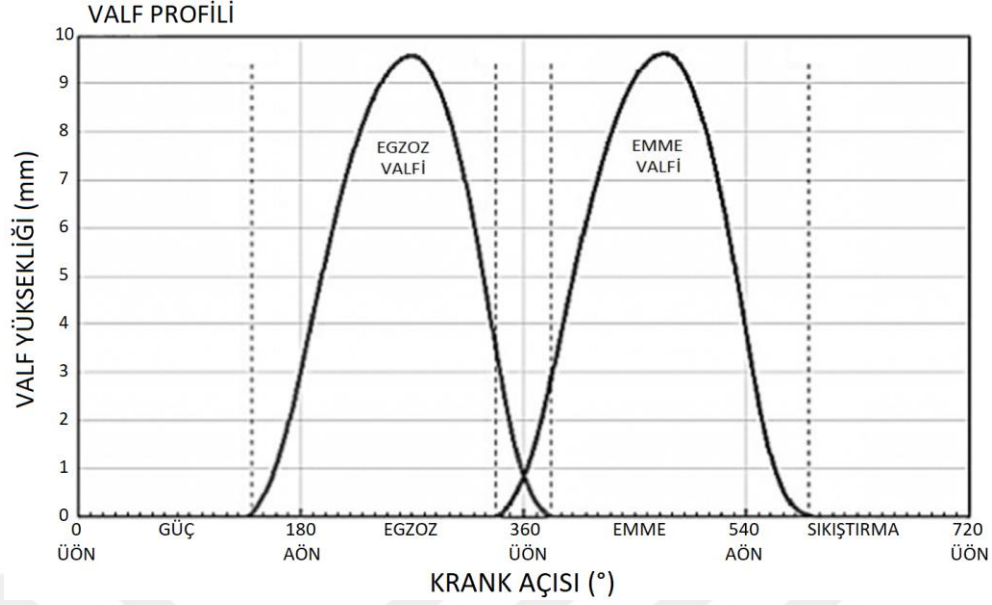
Rotax-914 karbüratörlü bir motordur ve GT-Power'da karbüratör modellemek için özel bir araç veya şablon bulunmamaktadır. Bu sebeple karbüratörün davranışını ve performansını modele yansıtmak için mevcut alternatif modellenebilecek ekipmanlar olarak enjektör ve hava kutusu kullanılmıştır. Karbüratör tüm krank açısı zamanlarında

yakıtı ve havayı karıştırmaktadır. Bu çalışma koşulunu benzetebilmek için enjektörün krank açısından bağımsız bir şekilde gerekli debide devamlı yakıt atımı gerçekleştirmesi ve hava kutusunda uygun debide hava ile karıştırılması modellenmiştir. Bu sayede enjektör ve hava kutusu kullanılarak karbüratör davranışı modellenenmiştir. Yakıt enjeksiyon miktarı, analiz programına motor devrine bağlı olarak bir tablo olarak tanımlanmıştır. Kullanılan yakıt ve karbüratör için tanımlanan özellikler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Yakıtın cinsini tanımlamak için 100 oktan havacılık benzini AVGAS seçilmiştir.

Çizelge 4.2. Kullanılan yakıtın ve karbüratörün özellikleri (I.Gamma Technologies, 2013)

Parametre	Değer
Yakıt Tipi	NASA indolen sıvısı
Yakıtın yoğunluğu	750 [kg/m ³]
Yakıtın ısı değeri	43.6 [MJ/kg]
Yakıt sıcaklığı	Ortam sıcaklığı + 15 [K]
Karbüratör Uzunluğu	130 [mm]

Rotax 914 motorunda her silindirde 1 adet emme ve 1 adet egzoz valfi bulunmaktadır. 1 boyutlu analiz programında valf modellemeye en önemli konu emme ve egzoz valflerinin açılma ve kapanma profilleridir. Rotax motorunda, diğer birçok motorda da olduğu gibi valfler kam mekanizmaları ile açılır ve kapanır. Motor üreticisinin paylaştığı valflerin hareket profili Şekil 4.1’de gösterilmiştir ve analiz programında üreticinin paylaştığı şekilde modellenmiştir. Ayrıca emme valflerinin çapı 38 mm ve egzoz valflerinin çapı da 32 mm’dir. (BRP Powertrain, 2010)



Şekil 4.1. Rotax 914 motorunun emme ve egzoz valflerinin kaldırma profilleri (BRP Powertrain ROTAX, 2019)

Gt Power 1 boyutlu analiz programında silindirleri modellemek için ısı transfer özellikleri, silindir sıcaklıkları ve yanma modeli doğru tanımlanmalıdır. Silindirlerdeki ısı transferinin türünü tanımlamak için çoğu endüstriyel uygulama için standart bir model olan Woschni modeli kullanılmıştır. Woschni modeli sayesinde krank açısına bağlı ısı transfer oranı hesaplanabilmektedir. Woschni'nin korelasyonu, uzaysal-mekansal ortalama anlık taşınım ısı akılarını tahmin etmek için en yaygın olarak kullanılan korelasyondur (Heywood, 1988). İçten yanmalı motor modelinde yanmayı tanımlamak için ise Wiebe fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon krank açısına bağlı enerji salınım miktarını hesaplamak için kullanılmıştır. Bu fonksiyon benzinli bir motor çevrimi için önceden karıştırılmış yakıt ve havanın yanmasını modellemek için uygun bir modeldir (Shojaefard ve Danamanesh, 2012). Wiebe fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır (Gamma Technologies, 2013):

$$Yanma(\theta) = (YV)[1 - e^{-(WS)(\theta - YBA)^{(E+1)}}] \quad (4.1)$$

θ krank açısı, E Wiebe kuvveti (varsayılan olarak 2 alınmaktadır), YV yanma verimi, WS Wiebe sabiti ve YBA ise yanmanın başlama açısıdır.

WS ve YBA 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6 numaralı denklemler ile hesaplanır. D yanma uzunluğu(derece), AA çapa açısı(yakıtın yarısının yandığı nokta), BM belirli bir çapa açısında yakılan yakıtın yüzdesel miktarı, BS yanma başlangıcında yakılan yakıtın yüzdesel değeri, BE yanma sonunda yakılan yakıt yüzdesel değeri, BMC yanma orta noktası, BSC yanma başlangıç sabiti ve BEC yanma bitiş sabitidir.

$$WS = \left(\frac{D}{BEC^{1/(E+1)} - BSC^{1/(E+1)}} \right)^{-(E+1)} \quad (4.2)$$

$$YBA = AA - \frac{(D)(BMC)^{1/(E+1)}}{BEC^{1/(E+1)} - BSC^{1/(E+1)}} \quad (4.3)$$

$$BMC = -\ln(1 - BM) \quad (4.4)$$

$$BSC = -\ln(1 - BS) \quad (4.5)$$

$$BEC = -\ln(1 - BE) \quad (4.6)$$

Bu çalışma kapsamında motor performans parametreleri kritik parametrelerden olduğu için, motor sürtünme kayıpları 1 boyutlu modeldeki önemli parametrelerdendir. GT-Power modelinde sürtünme kayıpları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Gamma Technologies, 2013):

$$FMEP = C_{FMEP} + (F_{P.C.P} P_{P.C}) + (F_{M.P.S} S_{M.P}) + (F_{S.M.P2} S_{M.P}^2) \quad (4.7)$$

FMEP ortalama sürtünme basıncı (Bar), C_{FMEP} sürtünme basınç katsayısı, $F_{P.C.P}$ maksimum silindir içi basınç katsayısı, $P_{P.C}$ maksimum silindir içi basıncı (Bar), $F_{M.P.S}$ piston hızına bağlı basınç sabiti, $S_{M.P}$ ortalama piston hızı (m/s), $F_{S.M.P2}$ ortalama piston hızının kare köküne bağlı basınç sabitidir. Bu denklem ayrıca “Chen Flynn sürtünme modeli” olarak anılır. Rotax motor modelinde sürtünme hesaplama parametreleri Çizelge 4.3'e göre seçilmiştir (Shojaefard ve Danamanesh, 2012). Motor dökümanlarına göre yanma sırası 1-4-2-3 olarak ayarlanmıştır (BRP Powertrain ROTAX, 2010).

Çizelge 4.3. Sürtünme fonksiyonu parametreleri (BRP Powertrain ROTAX, 2010)

Parametre	Değer
C_{FEMP}	0,4 Bar
$F_{P.C.P}$	0,006
$F_{M.P.S}$	0,08 Bar/(m/s)
$F_{S.M.P2}$	0,0006 Bar/(m/s) ²

Çalışma kapsamında farklı irtifalarda motor performansının da incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple (4.8) ve (4.9) numaralı denklemler sırasıyla farklı irtifalarda ortam sıcaklığını ve basıncını modellemek için kullanılmıştır (Gamma Technologies, 2013):

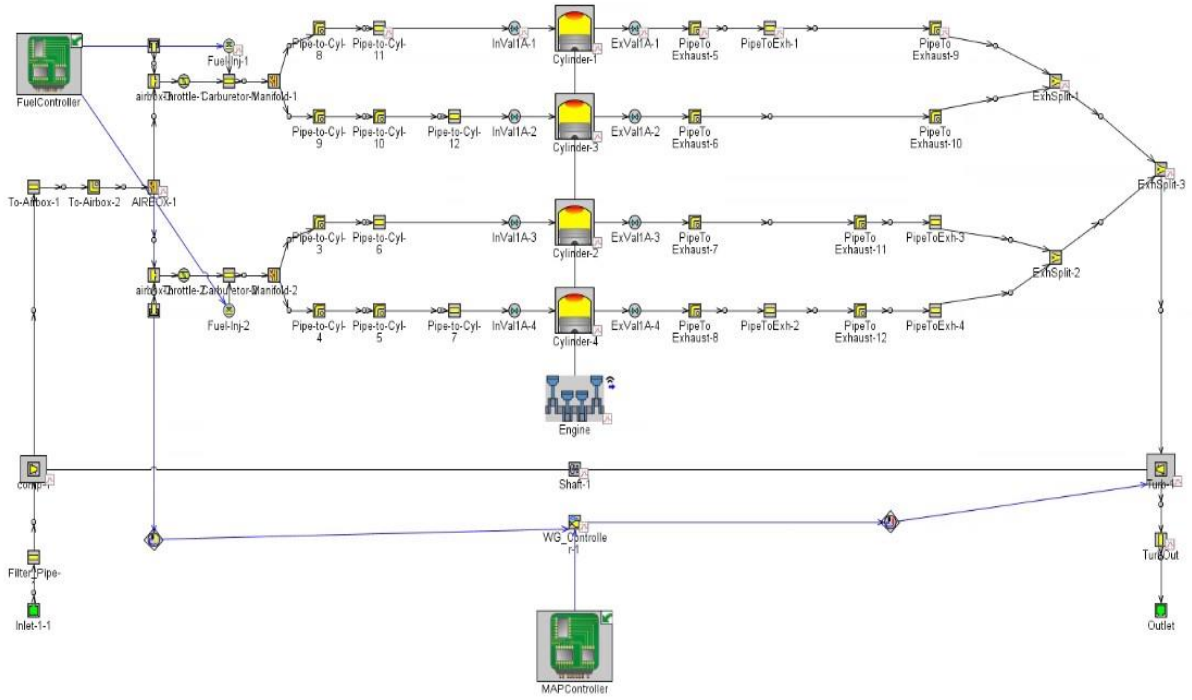
$$T = T_0 - 0.0065\Delta Z \quad (4.8)$$

$$P = P_0 \left(\frac{T_0 - 0.0065\Delta Z}{T_0} \right)^{\left(\frac{g}{0.005R} \right)} \quad (4.9)$$

P ortam basıncıdır, birimi Pa'dır. T ortam sıcaklığıdır, birimi K'dir. P_0 deniz seviyesindeki referans basınçtır ve 101325 Pa'ya eşittir. T_0 referans sıcaklığı 288,15 K'dir. ΔZ deniz seviyesinden yüksekliği ifade eder, birimi m'dir. Yerçekimi ivmesi de g sembolü ile gösterilmiştir, birimi m/s²'dir. R ise J/kg cinsinden gaz sabitidir.

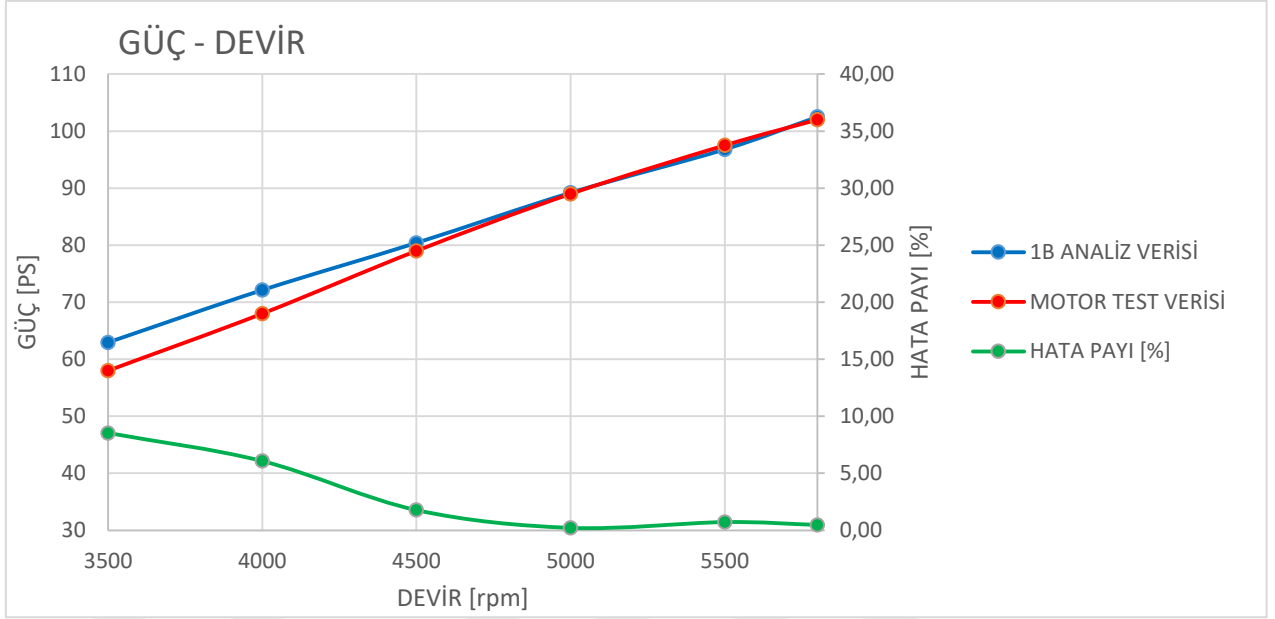
4.2 Motor Modelinin Doğrulanması

Şekil 4.2'de gösterildiği gibi motor bileşenlerinin tek boyutlu modellenmesi yoluyla GT-Power'da Rotax motor modeli geliştirildi. Model doğrulaması için beygir gücü, deniz seviyesinde maksimum sürekli güç koşulunda manifold basınçları, yakıt debisi ve BSFC gibi sonuçlar üreticinin test verileriyle kıyaslandı. Üreticinin test verileri tüm şekillerde MOTOR TEST VERİSİ adıyla kırmızı renkte, 1 boyutlu motor modeli verileri 1B ANALİZ VERİSİ adıyla mavi renkte ve analiz verisi ile test verisindeki sapma oranı ise HATA PAYI adıyla yeşil renkte temsil edilmektedir.



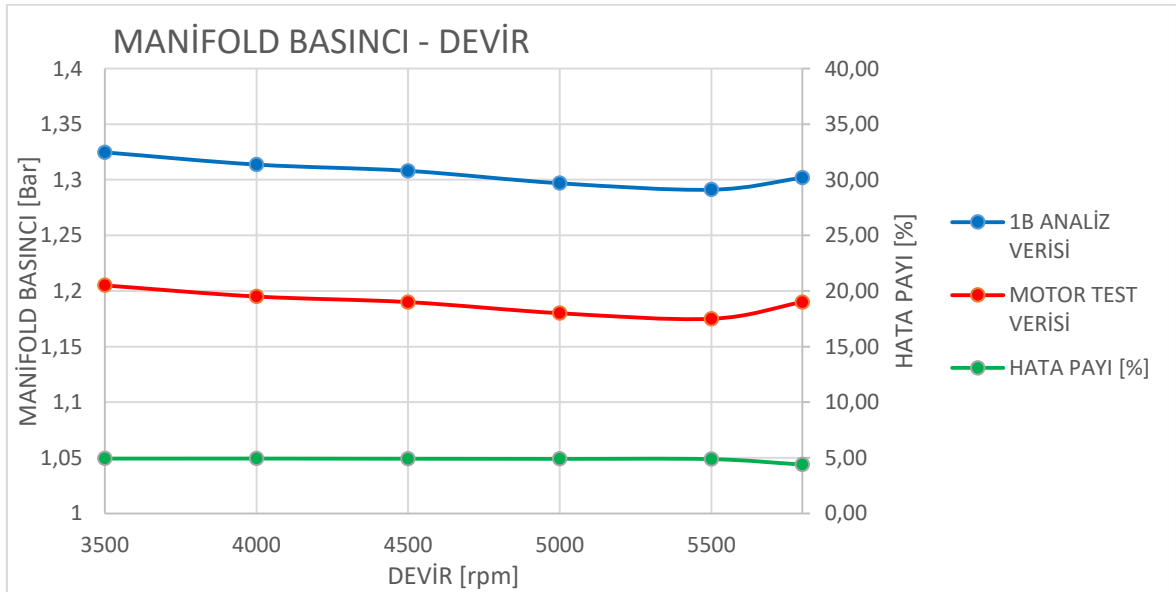
Şekil 4.2. GT Power Programında Oluşturulmuş 1 Boyutlu Rotax 914 Motor Modeli

Şekil 4.3'de deniz seviyesinde ve standart atmosfer sıcaklığı koşullarında motor devrine bağlı motor gücü grafiği gösterilmiştir. Motor gücü için analiz sonuçları özellikle motorun yüksek güç verdiği 4500 rpm – 5800 rpm devir aralıklarında %2'den daha düşük hata payına sahiptir ve bu oran oldukça tatmin edicidir. 3500 rpm gibi daha düşük motor devirlerinde ise analiz ile test verisi sonuçları arasındaki hata payı %8,5'e kadar çıkmaktadır. Bu da demektir ki motor devrine bağlı güç verisinde çalışmanın odaklandığı yüksek devirlerde %98'in üzerinde bir doğruluk payı mevcuttur, tüm devirlere odaklanıldığında ise analiz sonuçları %90'ın üzerinde bir doğruluk payına sahiptir. Bu sebeple sonuçlar maksimum hata ile en düşük motor devirlerinde bile hala kabul edilebilirdir.



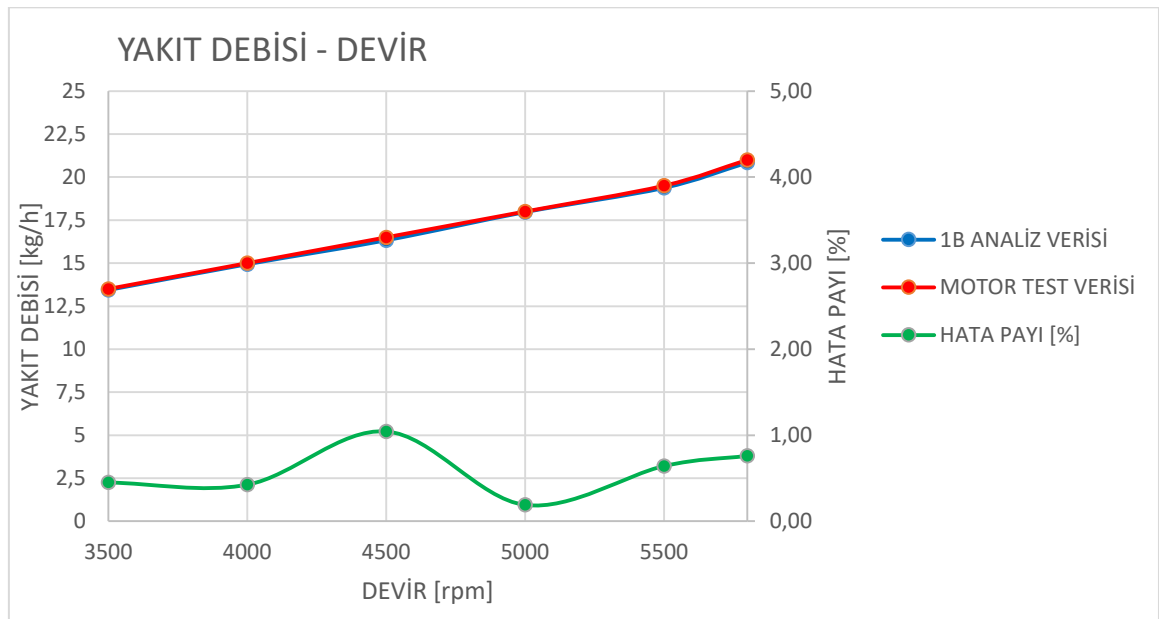
Şekil 4.3. Motor devrine bağlı güç verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması

Şekil 4.4: Motor devrine bağlı manifold giriş basıncı verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması gösterilmiştir. Tüm devirlerde yaklaşık %5 hata payı mevcuttur, test verilerine göre model verileri daha yüksektir, motor gücü ve diğer performans verilerini tutturabilmek ancak manifold giriş basıncını daha yüksek tutarak mümkün olmuştur. Manifold giriş basıncı hassasiyeti modelin gelişmeye açık yönlerindendir.



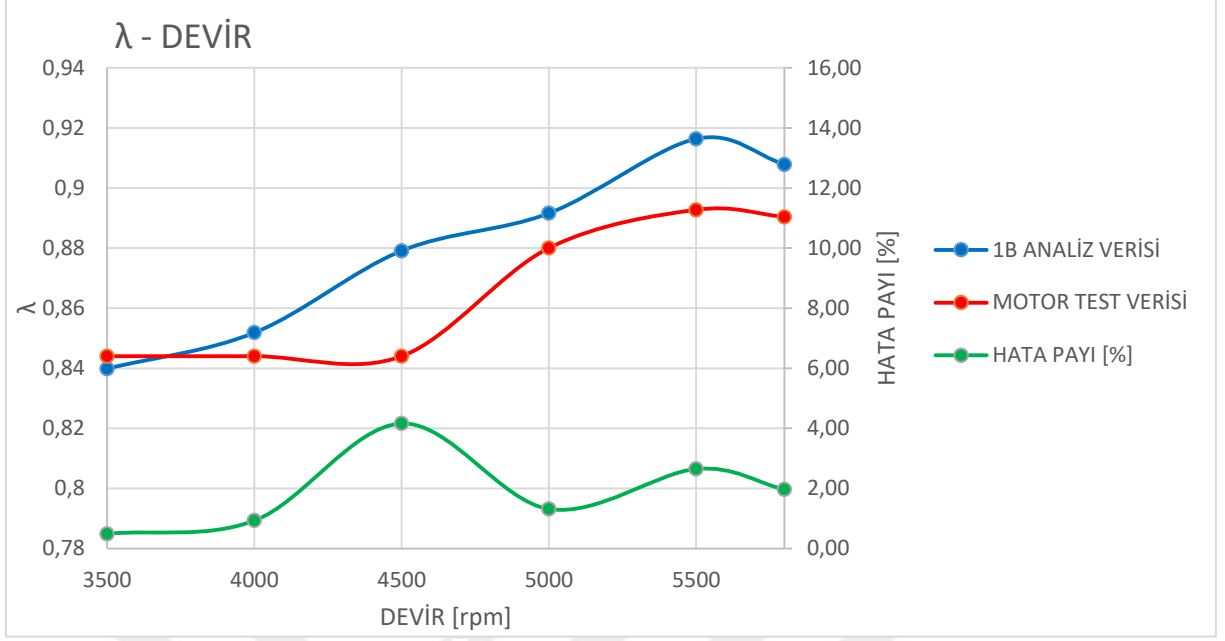
Şekil 4.4. Motor devrine bağlı manifold giriş basıncı verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması

Şekil 4.5’de deniz seviyesinde ve standart atmosfer sıcaklığı koşullarında motor devrine bağlı kütleli yakıt tüketimi debisi grafiği gösterilmiştir. Motor devrinin yükselmesiyle birlikte kütleli yakıt debisi de beklendiği şekilde artmaktadır. Tüm devirlerde kütleli yakıt debisi hata payı en fazla %1,04 olmuştur. Yakıt debisi çok yüksek doğrulukla modellenenmiştir çünkü üreticinin verdiği yakıt tüketimi bilgileri motor modelinde enjektöre direkt modellenenmiştir. Bu sayede tüm motor devirlerinde yaklaşık %99 doğruluk sağlanmıştır.



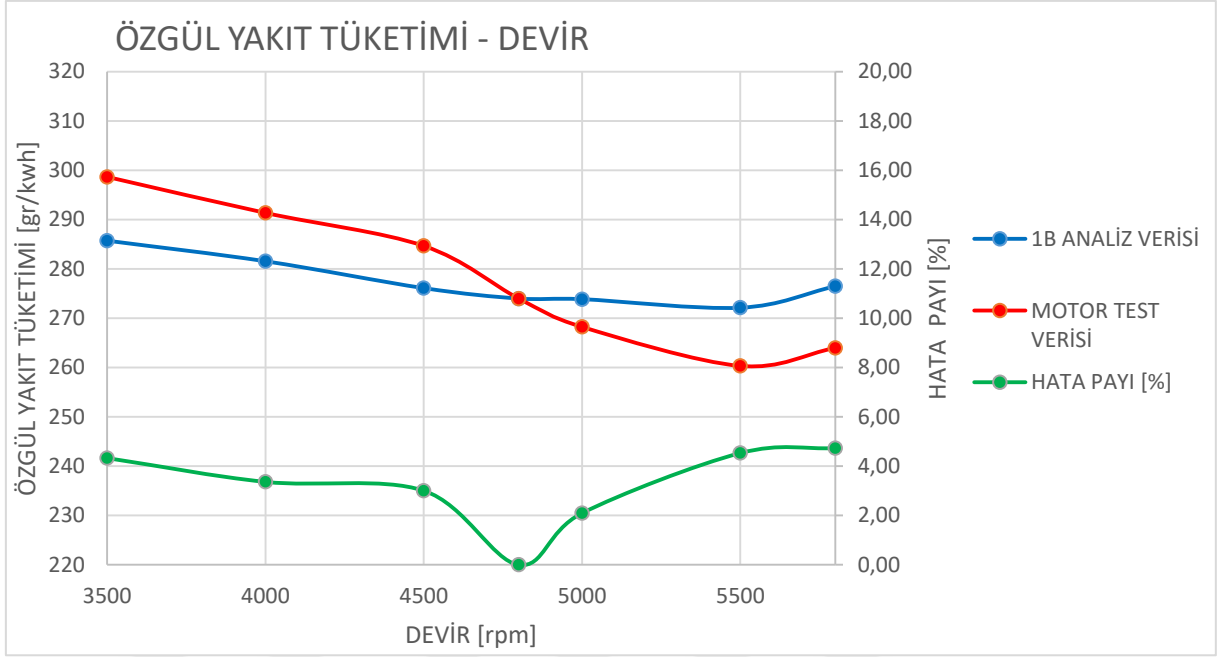
Şekil 4.5. Motor devrine bağlı yakıt debisi verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması

Şekil 4.6’da deniz seviyesinde ve standart atmosfer sıcaklığı koşullarında motor devrine bağlı λ grafiği gösterilmiştir. Yakıt hava oranını gösteren λ değerinin analiz ve test verileri kıyaslamasında en yüksek hata payı %4,16’dır, bu oran motor devri 4500 rpm’deyken gerçekleşmiştir. Dolayısıyla λ verilerine göre motor modeli tüm devirler için %96 ve üzerinde doğruluk payına sahiptir. Bir önceki grafikte 1 boyutlu modelde yakıt hattının yüksek doğrulukla modellenildiği kütleli yakıt debisi verileri aracılığıyla gösterilmişti. Bu grafikte de yakıt hava karışımının bir fonksiyonu olan λ ’nın yüksek doğruluk içeren sonuçları sayesinde 1 boyutlu modelde hava hattının da yüksek doğrulukla modellenildiği sonucu elde edilmiştir.



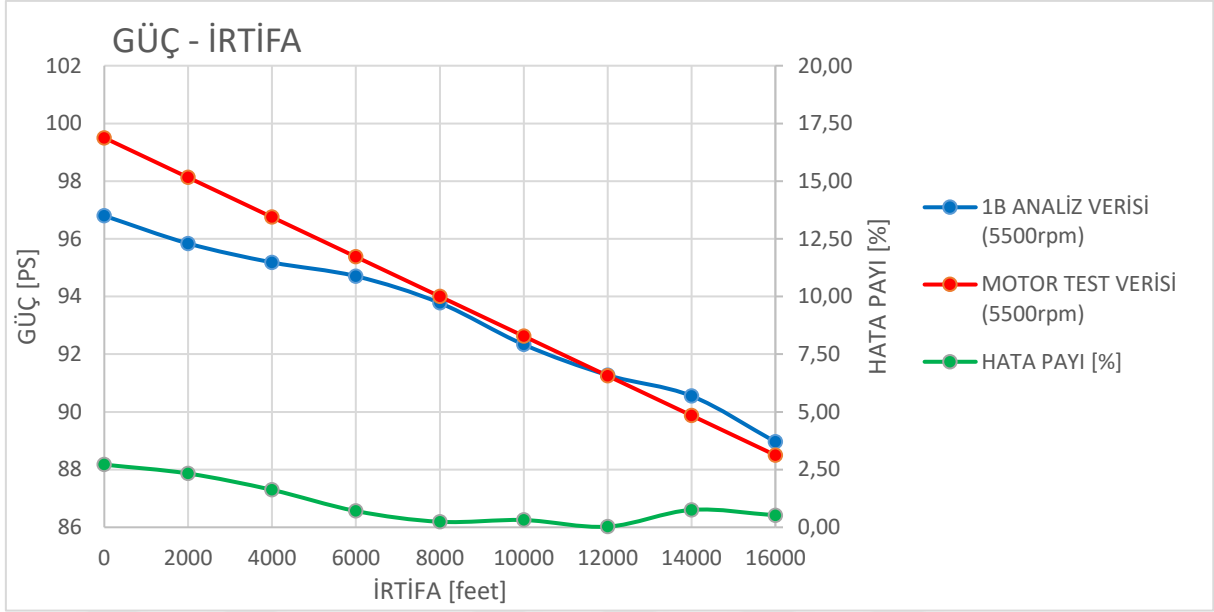
Şekil 4.6. Motor devrine bağlı λ verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması

Üretici, motor devrine bağlı özgül yakıt tüketimi verilerini doğrudan yayınlamamıştır. Özgül yakıt tüketimi, motorun 1 gram yakıt kullanarak kWh cinsinden ne kadar enerji üretebildiğini gösteren bir fonksiyondur ve motorun verimliliğini işaret eder. Motorun test verilerinde ürettiği güç ve tükettiği yakıt bilindiği için bu sayede BSFC test verileri de hesaplanabilmektedir. Şekil 4.7’de deniz seviyesinde ve standart atmosfer sıcaklığı koşullarında motor devrine bağlı özgül yakıt tüketimi grafiği gösterilmiştir. 4500 rpm’e kadar motor test verisi sonuçları daha yüksek iken, 5000 rpm ve üzeri devirler için 1B analiz verisi sonuçları daha yüksektir. 4500 ile 5000 rpm arası bir noktada ise model ile test sonuçları tam olarak eşittir, bu noktadan sonra model sonuçları ve test verileri karakter değiştirmiştir. Bu durumun sebebi, motor gücü test verilerinin 4500 rpm’e kadar motor gücü 1B analiz verilerinden daha düşük ancak 5000 rpm ve üzeri devirler için ise daha yüksek olmasıdır. Yakıt tüketimi çok yüksek doğrulukla modellenebildiği için, özgül yakıt tüketiminin model sonuçları motor gücü model sonuçlarına paralellik göstermektedir. Analiz verileri ve test verileri arasındaki en yüksek hata payı %4,73’tür. Yani motor modelinin özgül yakıt tüketimi sonuçları %95’in üzerinde bir doğruluk payına sahiptir. Bu sonuçlar bize motor modelinin ayrıca sürtünme ve vakumlama kayıplarının da yeterli doğrulukla modellendiğini göstermektedir.

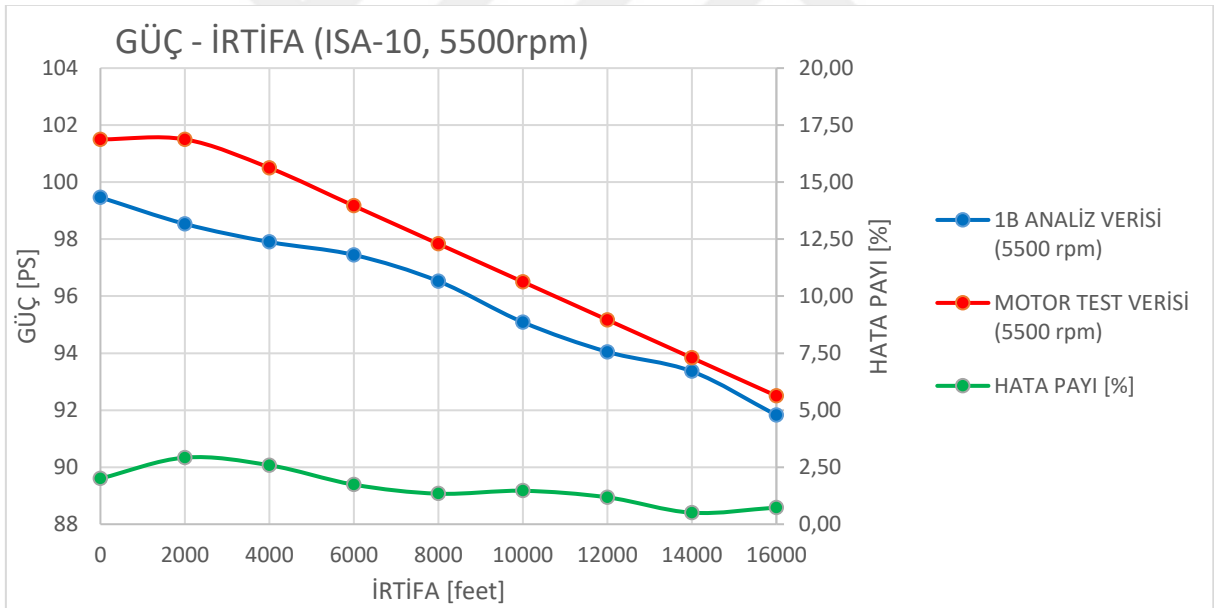


Şekil 4.7. Motor devrine bağlı özgül yakıt tüketimi verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması

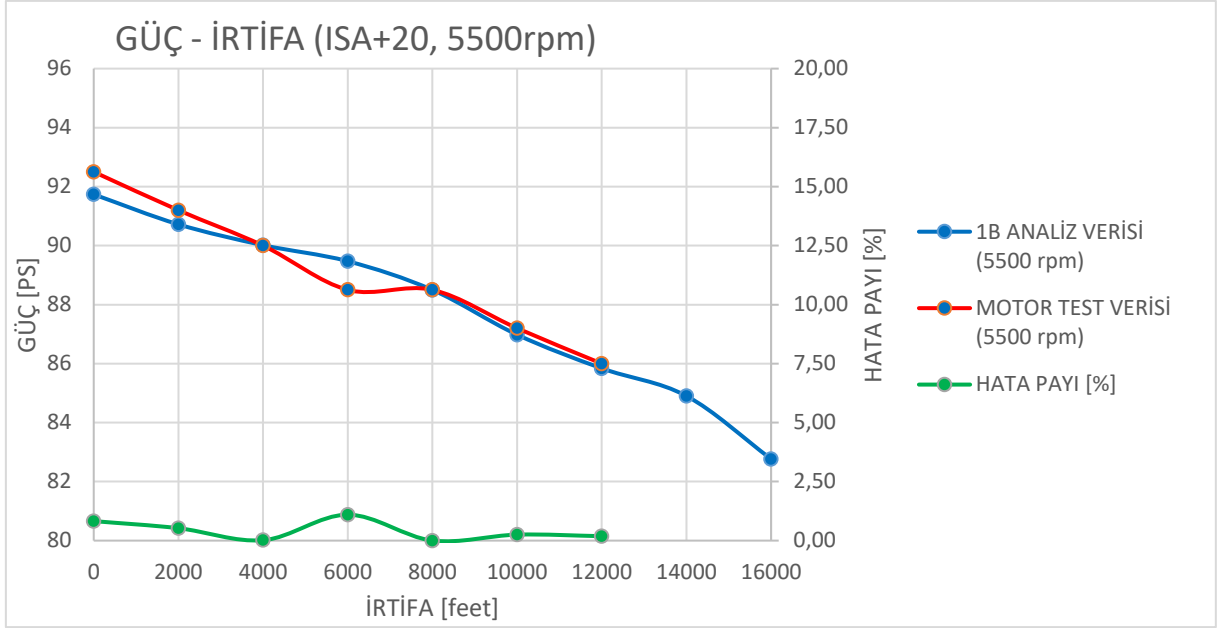
Motor üreticisi tarafından sağlanan bir diğer önemli veri ise 16000 feet'e kadar irtifaya bağlı motor gücüdür. Ortamdaki hava yoğunluğunun azalması nedeniyle motor gücü azalır (Yang vd., 2017). Geliştirilen modelin analiz sonuçları test verileriyle kıyaslandığında yüksek irtifalarda motor gücünün analiz tarafından doğru bir şekilde tahmin edilebildiği görüldü. Şekil 4.8'de standart atmosfer sıcaklığında 5500 rpm motor hızında deniz seviyesinden 16000 feet irtifaya kadar motor gücü gösterilmektedir. Bu koşullarda motor gücündeki hata payının en fazla %2,7 olduğu gösterilmiştir. Şekil 4.9'da ise standart atmosfer sıcaklığından 10°C daha düşük sıcaklıkta ve yine motor devri 5500 rpm iken deniz seviyesinden 16000 feet irtifaya kadar motor gücü gösterilmektedir. Bu koşullarda ise motor gücündeki hata payının en fazla %2,92 olduğu gösterilmiştir. Şekil 4.10'da ise standart atmosfer sıcaklığından 20°C daha yüksek sıcaklıkta ve yine motor devri 5500 rpm iken deniz seviyesinden 12000 feet irtifaya kadar motor gücü gösterilmektedir. Bu koşullarda ise motor gücündeki hata payının en fazla %1,1 olduğu gösterilmiştir. Bu 3 grafik sonuçlarına göre motorun daimi maksimum gücünü verdiği 5500 rpm'de yer seviyesinden 16000 feet'e kadar çeşitli sıcaklıklarda 1 boyutlu modelin doğruluk seviyesi %97'nin üzerindedir.



Şekil 4.8. 5500 rpm’de, ISA0°C’de, irtifaya bağlı motor gücü verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 4.9. 5500 rpm’de, ISA-10°C’de, irtifaya bağlı motor gücü verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 4.10. 5500 rpm’de, ISA+20°C’de, irtifaya bağlı motor gücü verileri ile test ve analiz sonuçlarının kıyaslanması

Motor hızına bağlı motor gücü, motor hızına bağlı yakıt tüketimi, motor hızına bağlı λ , motor hızına bağlı özgül yakıt tüketimi, irtifaya bağlı motor gücü ve çeşitli irtifalarda sıcaklık değişimlerine bağlı motor gücü verileri 1 boyutlu olarak modellenmiş, analiz koşulmuş ve analiz sonuçları üreticinin paylaştığı motor test verileriyle kıyaslanmıştır. Kıyaslanan tüm verilerde modelin en az %90’lık bir doğruluk payına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu doğruluk payının yapılacak çalışma için yeterli olduğu gözükse de aslında çalışmanın en önemli devir aralıkları olan 4500 rpm üstü devirler için model %95 doğruluk payı ile daha hassas sonuçlar verebilmektedir.

Turboşarj kompresör ve türbin bileşenlerinin çalışma haritaları turboşarj üreticisi “Garrett” veya motor üreticisi “Rotax” tarafından paylaşılmamıştır. Bu haritalar verim, hız, basma oranı, hava debisi, dalgalanma ve boğulma limitleri, yüksek hız limiti gibi veriler içermektedir. Motorda kullanılan turboşarj sisteminin üreticisi ve model ismi bilinse dahi (Garrett T-25) ilgili haritalara açık kaynak sistemlerden de erişilememiştir. Bu sebeple motor modeli oluşturma safhasında yaşanan en büyük zorluk, incelenen tüm motor performans parametrelerinin her birini çeşitli irtifa ve sıcaklıklarda da %90’ın üzerinde sağlayabilecek, uygun turboşarj kompresör ve türbin haritalarının belirlenmesi olmuştur. Bu durum modelin nispeten hassasiyetinin düşmesine sebep olmuştur. Çalışmanın

odaklandığı yüksek motor devri bölgeleri için %95'in üzerinde doğruluk payı elde edilmiş ve uygun turboşarj kompresör ve türbin haritaları deney tasarımı yöntemiyle çok tekrarlı şekilde analiz koşullup belirlenerek 1B analiz programında modellenmiştir.

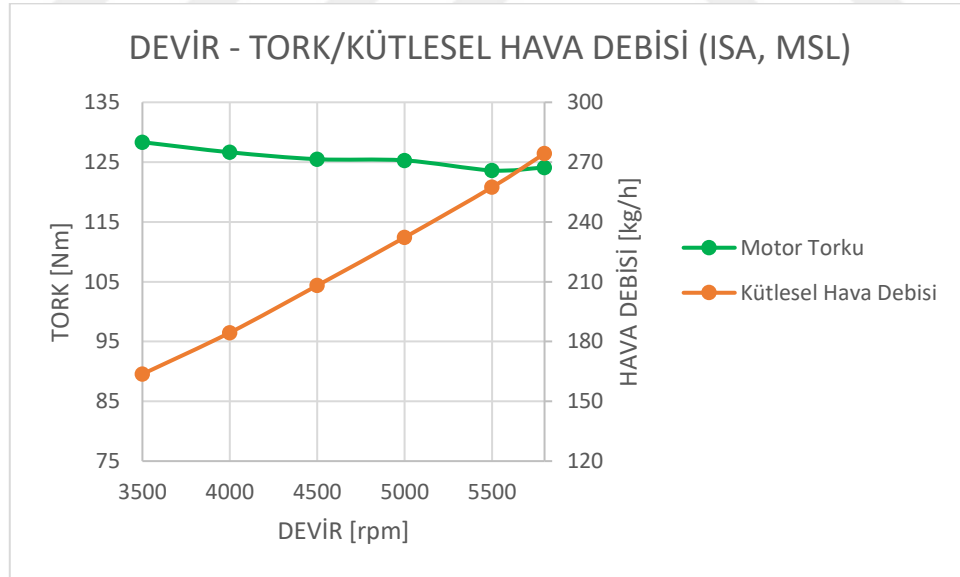
Emekli ve Özgül (2014) de çalışmaları kapsamında kurdukları modelin test sonuçları ile arasındaki bağıl hata payının genel olarak %10 seviyesinin altında olduğunu gözlemlemişlerdir. Kompresör ve türbin modellerinin hassasiyetinin düşük hava debisinin olduğu düşük motor devirleri bölgelerinde azaldığını ancak o bölgelerin çalışmaları kapsamında odak nokta olmaması nedeniyle modelin genel hassasiyetine etkisinin fazla olmadığını belirtmişlerdir. (Emekli ve Özgül, 2014)

Sonuç olarak Emekli ve Özgül (2014)'ün de belirttikleri gibi incelemenin odaklandığı çalışma bölgesinde modelin doğrulandığı ve takip eden çalışmaların sonuçlarının da %95 oranında güvenilir olacağı söylenebilir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Deniz Seviyesinde Farklı Devirlerde Motor Performansı

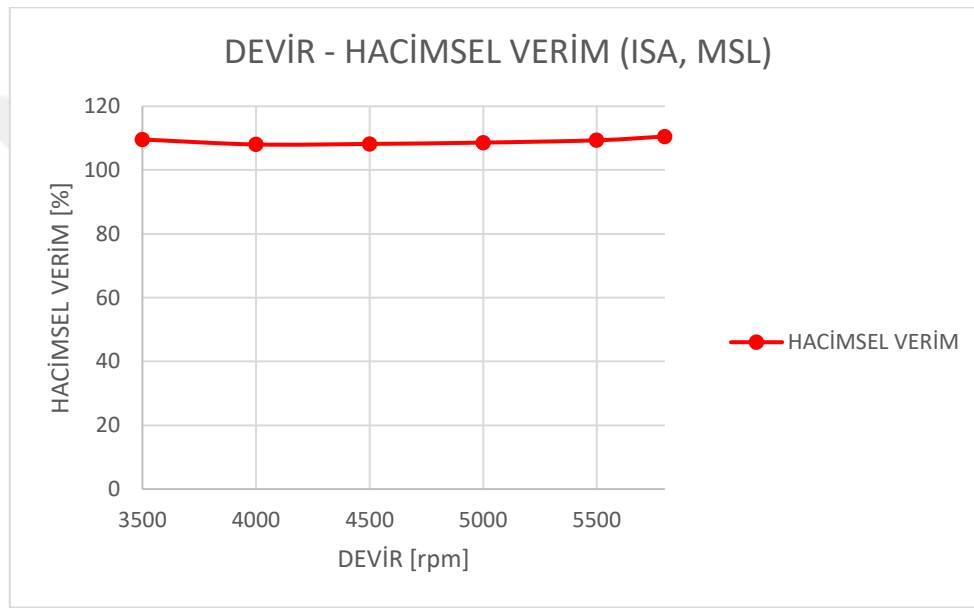
Güç, yakıt debisi ve özgül yakıt tüketimine ek olarak, geliştirilen 1 boyutlu model sayesinde deniz seviyesindeki ve daha yüksek irtifalardaki koşullarda diğer önemli parametreler de analiz edilebilir. Örneğin Şekil 5.1’de motor devrine bağlı kütleli hava debisindeki ve motor torkundaki değişimler gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, motor torku tüm devirlerde yaklaşık lineer bir eğri gösterse de motor devri arttıkça hafif bir şekilde azalmaktadır. Başka bir deyişle, maksimum motor torku 3500 rpm’de gerçekleşir. Buna karşılık, motor hızı arttıkça giriş havası kütleli debisi de artmaktadır. 5800 rpm motor devrinde silindirler içine alınan kütleli hava debisi 274 kg/h değeri ile tüm devirler arasındaki en yüksek debi miktarına ulaşmaktadır.



Şekil 5.1. Motor devrine bağlı motor torku ve kütleli hava debisinin değişimi

Hacimsel verim ifadesi standart atmosfer koşullarında ve deniz seviyesinde motorun alabileceği hava miktarına kıyasla mevcut şartlarda motorun silindirleri içine aldığı hava miktarının oranını ifade eder. (Heywood, 1988)

Şekil 5.2'de ise motor devri 3500 rpm'den 5800 rpm'e kadar hacimsel verim eğrisi gösterilmiştir. Hacimsel verim tüm motor devirlerinde %108-%110 aralığında benzer bir değişim göstermektedir. Bu lineere yakın eğri turboşarj sisteminin tüm devirlerde benzer etkinlikte çalışabildiğini göstermektedir. Turboşarj sistemi sayesinde manifold basıncı atmosfer basıncından daha yüksektir, bu şekilde motor sahip olduğu silindir hacminden daha fazla havayı alabilmektedir ve motorun hacimsel verimi yer seviyesinde %100'ün üzerine çıkabilmektedir.

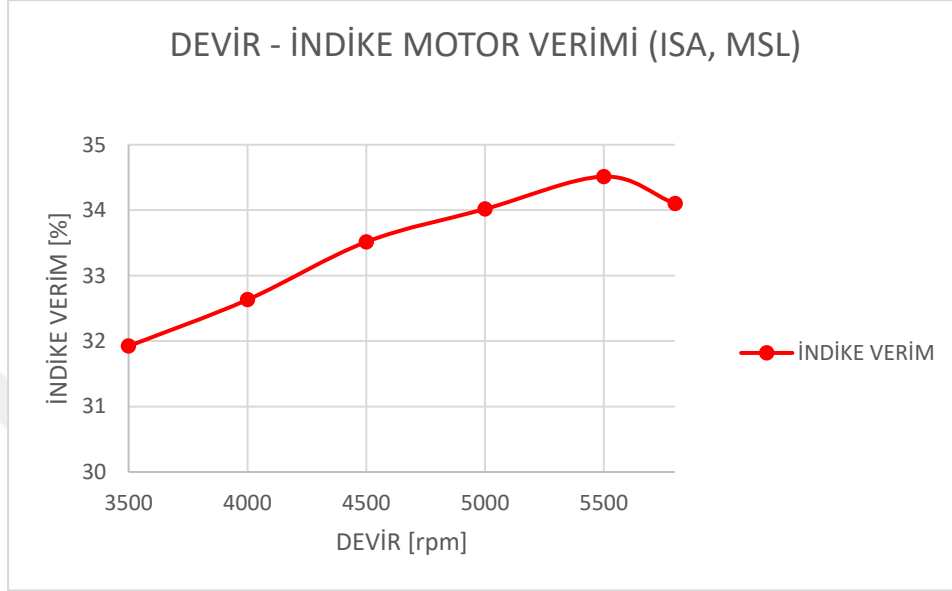


Şekil 5.2. Motor devrine bağlı hacimsel verim değişimi

Yakıtın yanması ile elde edilen toplam iş indike iş denir ve indike verim ifadesi ise yanma verimi ile termodinamik verimin çarpımına eşittir. Bir başka deyişle motor veriminin sürtünme ve gaz akış kayıpları öncesi haline indike verim denmektedir. Yani indike verim sürtünme ve gaz akış verimleriyle çarpıldığında net motor verimi elde edilir. (Heywood, 1988)

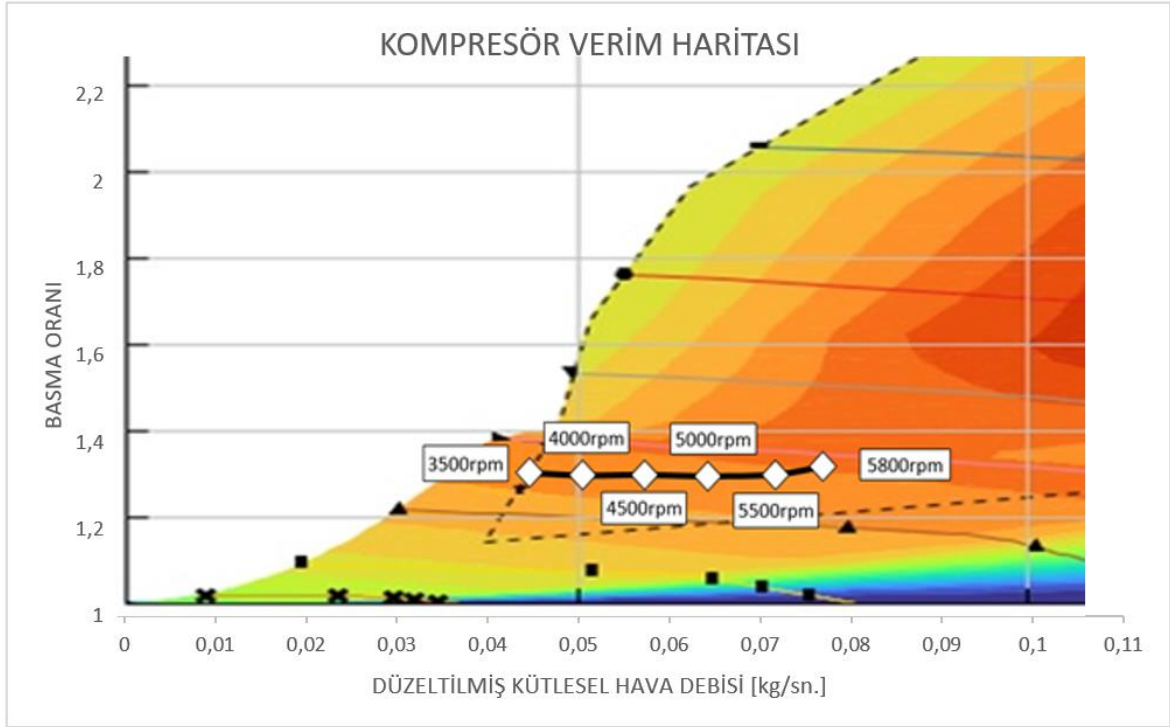
Şekil 5.3'de motor devrine bağlı indike motor verimi değişimi gösterilmiştir. İndike en düşük motor verimi 3500 rpm'de %32 iken, en yüksek motor verimi ise 5500 rpm'de %34 ile elde edilmiştir. Bu veri de göstermektedir ki Rotax motorunun en uygun çalışma devri 5500 rpm'dir. Erbay ve Yavuz (1999) çalışmalarında stirling motorunda en yüksek

termal verimin maksimum güç bölgesinde olmadığı sonucunu belirtmişlerdir. Aynı sonuç pistonlu Rotax motorunda da geçerli olduğu gözükmemektedir.



Şekil 5.3. Motor devrine bağlı indike motor verimi değişimi

Şekil 5.3’de deniz seviyesinde ISA şartlarında 3500 rpm’den 5800 rpm’e kadar motor devrine bağlı turboşarj kompresör çalışma bölgesi gösterilmiştir. Kompresör basma oranı deniz seviyesinde bütün motor devirlerinde yaklaşık sabittir. Motorun nominal hızındaki(5500 rpm) basma oranı yaklaşık 1,32’dir. Bu durumda, tahliye hattı açıklık çapı 28,3 mm’dir. Ayrıca motor devri arttıkça kompresör üzerinden geçen düzeltilmiş kütleli hava debisi miktarı da artmaktadır. Öte yandan motor devri arttıkça kompresör düzeltilmiş hızı da artmaktadır. 3500 rpm motor devrinde kompresör düzeltilmiş hızı 65000 rpm iken, 5800 rpm motor devrinde yaklaşık 71000 rpm’e çıkmaktadır. Kompresör verimi ise tüm devirlerde yaklaşık %70’dir. 3500 rpm motor devrinde turboşarj kompresör ünitesi dalgalanma limitine çok yakın çalışmaktadır ancak motor devri arttıkça çalışma bölgesi dalgalanma limitinden güvenli bölgeye geçmekte ve kompresör verimi de artmaktadır.

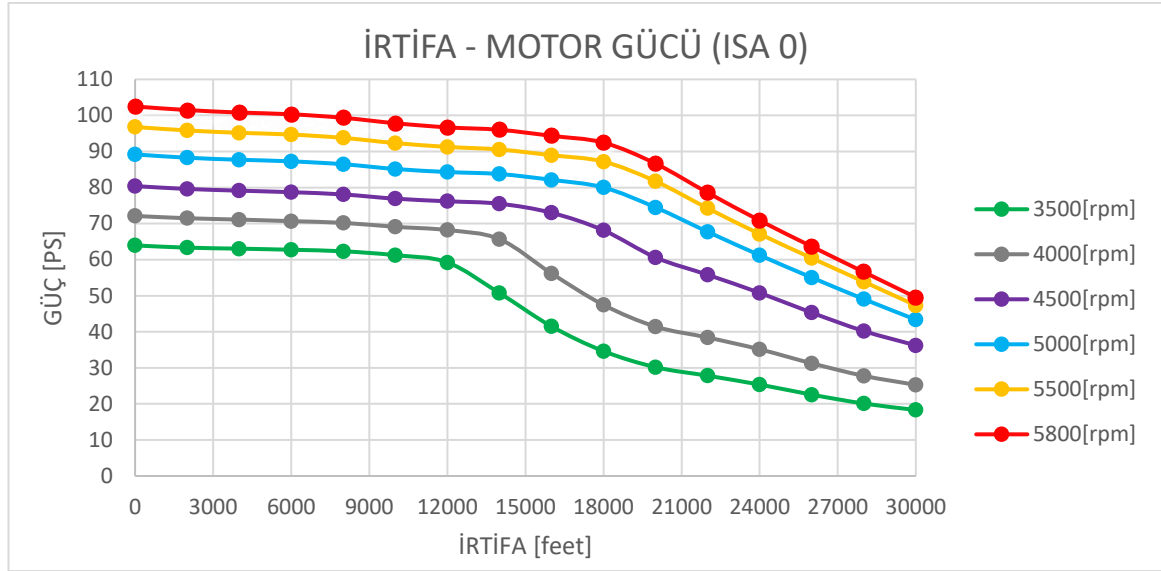


Şekil 5.4. Deniz seviyesinde, ISA şartlarında, 3500 rpm'den 5800 rpm'e kadar motor devrine bağlı turboşarj kompresör çalışma bölgesi

5.2 Farklı İrtifalarda Motor Performansı

Güç, özgül yakıt tüketimi, kütleli hava debisi, hacimsel verim ve turboşarjın çalışma bölgesi yüksek irtifalarda en önemli performans parametreleri arasındadır (Perez ve Boehman, 2009). Bu çalışmada bu parametreleri tahmin etmek ve analiz etmek için motor, gaz keleşinin tamamen açık olduğu maksimum sürekli güçte, yani %100 gaz kolunda düşünölmüştür. Parametrelerdeki değışimler, motorun kapsamlı bir analizi için deniz seviyesinden 30000 feet'e kadar 5 farklı motor devrinde sunulmaktadır.

Şekil 5.5'de gösterildiğı gibi, motorun yüksek güç verdiğı 5500 rpm ve 5800 rpm'de motor gücü yaklaşık 18000 feet irtifadan sonra önemli ölçüde azalmaya başlar. Bu düşüş eğilimi, daha düşük hızlarda 12000 feet irtifada başlar. Ayrıca 5500 rpm için 30000 feet irtifada motor gücü deniz seviyesine kıyasla %51 oranında azalmaktadır.

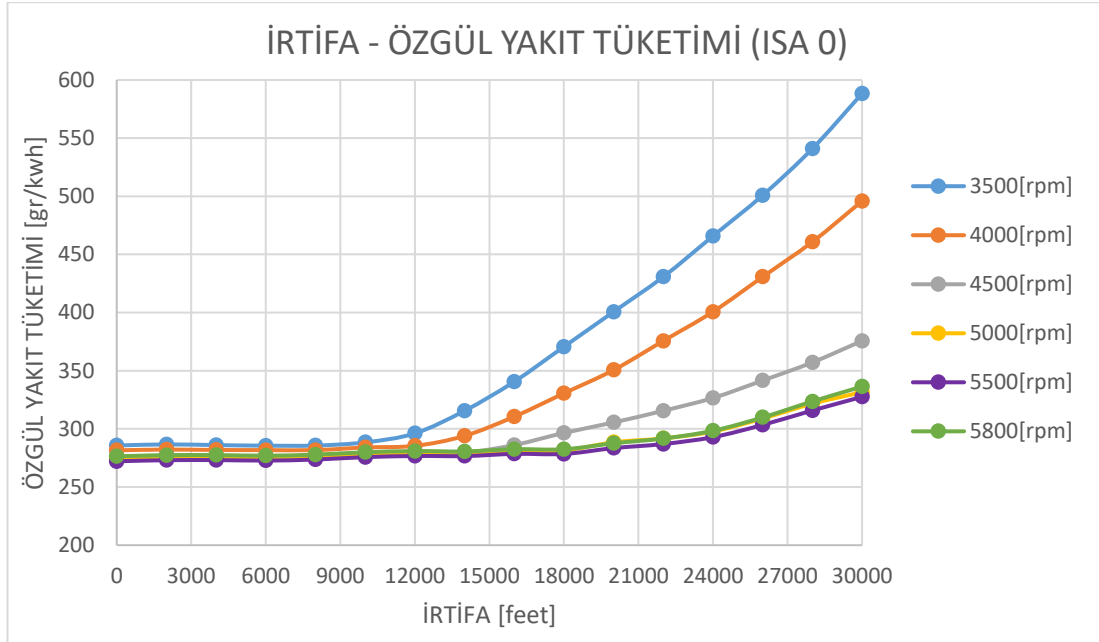


Şekil 5.5. Beş farklı motor devrinde irtifaya bağlı motor gücü değişimi

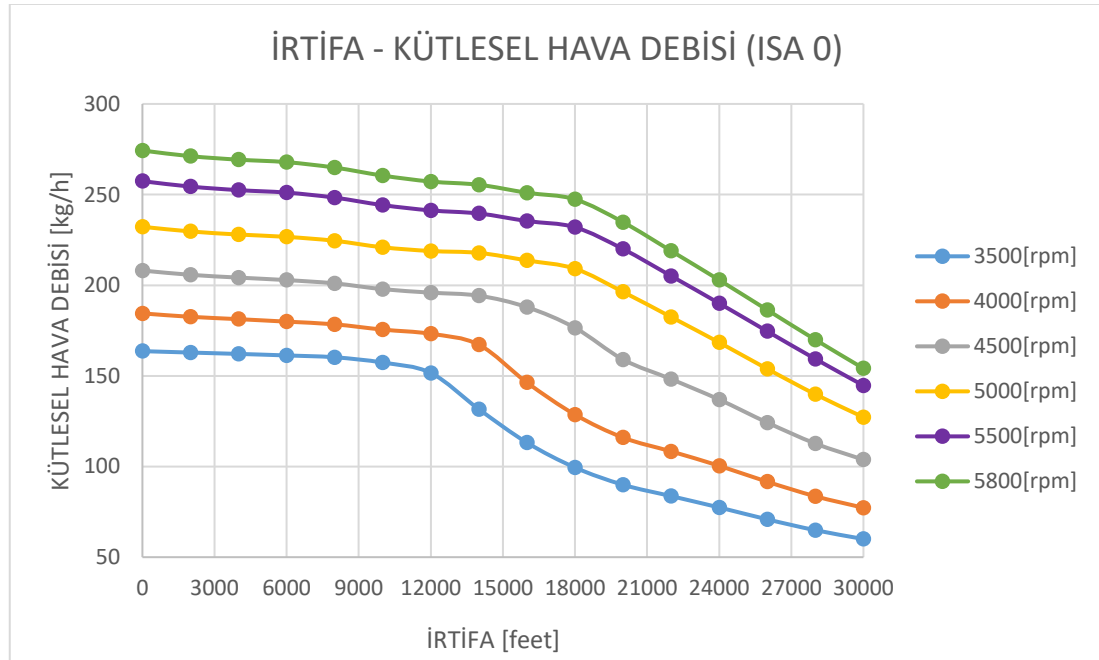
Şekil 5.6'ya göre, irtifa yükseldikçe motor gücü azaldığı için özgül yakıt tüketimi de yükselmektedir. 12000 feet irtifaya kadar özgül yakıt tüketimi yaklaşık olarak sabit kalırken, daha yüksek irtifalarda motorun güç kaybetmesi sebebiyle hızla yükselir. Motorun 5500 rpm'de 30000 feet'de özgül yakıt tüketimi deniz seviyesine kıyasla yaklaşık %20 artar. Ayrıca motor devri yükseldikçe güç üretimi arttığı için özgül yakıt tüketimi de düşer. Özellikle yüksek irtifalarda düşük motor hızlarında kütleli hava debisi çok düştüğü için özgül yakıt tüketimi de çok artmaktadır. 3500 rpm motor hızında 30000 feet irtifada giriş hava debisi deniz seviyesine kıyasla %106 artmıştır. Çok yüksek irtifalarda düşük motor hızlarında yakıt tüketimi güç üretimine oranla çok yüksek bir seviyeye gelmekte, bu da bizlere bu motorun 30000 feet gibi irtifalarda düşük hızlarda kullanılmasının çok da verimli olmadığını göstermektedir.

İrtifaya bağlı silindir içine alınan kütleli hava debisi değişimi Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Bu grafik ile irtifaya bağlı güç grafiği birbirine çok benzemektedir çünkü yüksek irtifalarda motor gücü sınırlayıcı faktör silindir içine alınan hava miktarıdır. 5500 rpm motor devrinde kütleli hava debisi 30000 feet yükseklikte deniz seviyesine kıyasla yaklaşık %44 azalmaktadır. Öte yandan bu koşullar altında atmosferdeki havanın yoğunluğu ise %63 oranında azalmaktadır. Turboşarj ünitesi sayesinde yüksek irtifada havanın yoğunluğunun azalmasının etkileri azaltılmıştır. Ayrıca motor devri yükseldikçe

silindir içine alınan kütleli hava debisi miktarının da artması durumu deniz seviyesinden 30000 feet'e kadar tüm irtifalar için geçerliliğini korumaktadır.

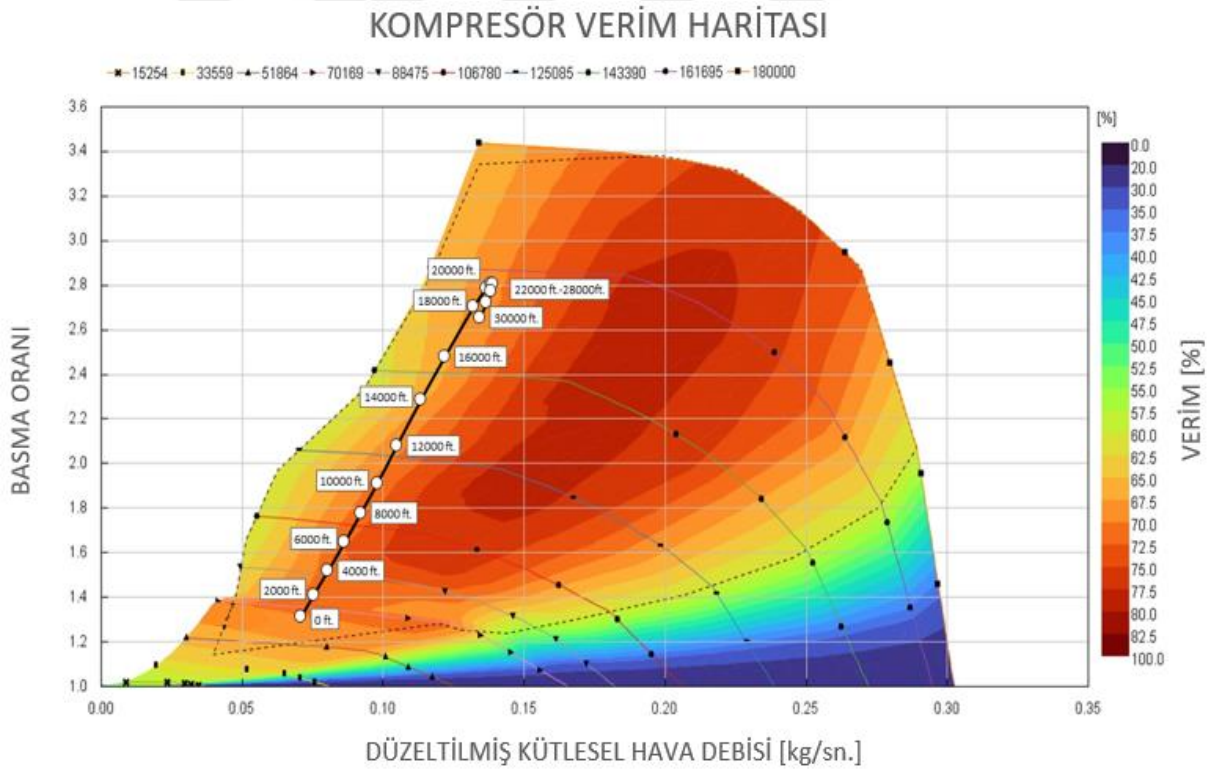


Şekil 5.6. Altı farklı motor devrinde irtifaya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi



Şekil 5.7. Altı farklı motor devrinde irtifaya bağlı kütleli hava debisi değişimi

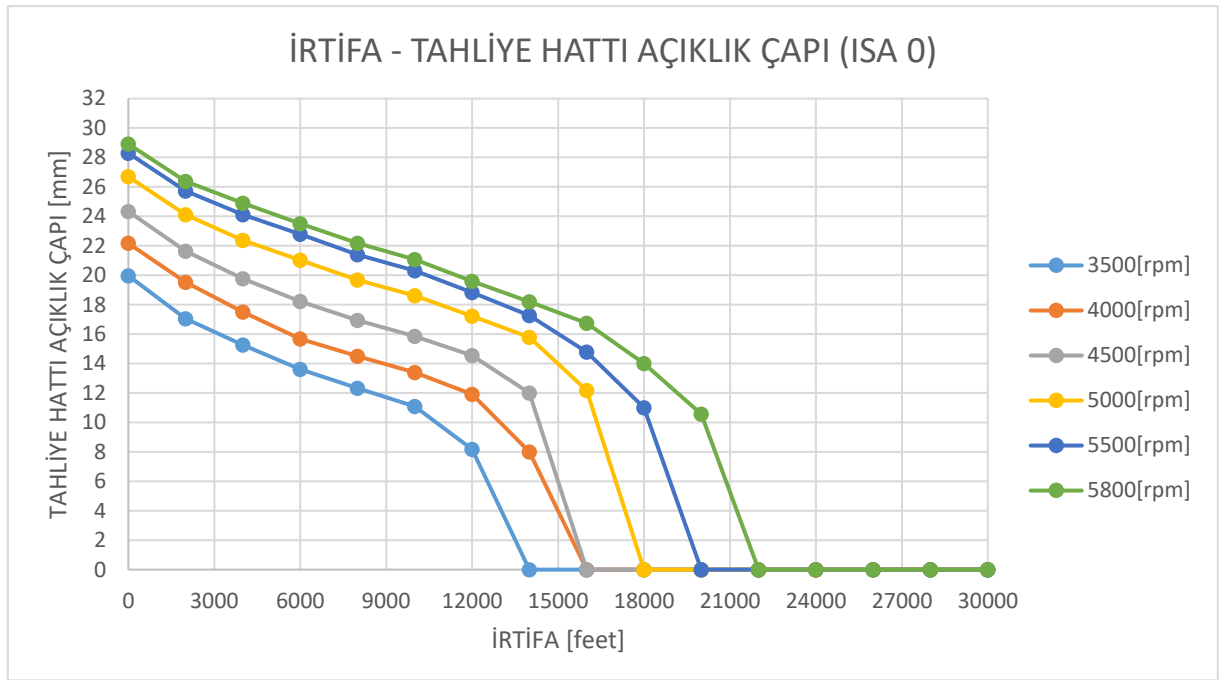
Şekil 5.8’de 5500 rpm motor hızında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar turboşarj kompresör çalışma bölgesi gösterilmiştir. Kompresörün çalışma bölgesi boyunca, deniz seviyesinden 20000 feet’e kadar hem düzeltilmiş kütleli hava debisi, hem de basma oranı doğrusal şekilde artış gösterir. Kompresör, dalgalanma ve boğulma bölgelerinden uzakta uygun bir aralıkta ve yaklaşık %70 verim bölgesinde çalışmaktadır. En yüksek düzeltilmiş kompresör hızı 160000 rpm, en yüksek basma oranı 2,81 kat ve en yüksek düzeltilmiş kütleli hava debisi 0,14 kg/s ile yaklaşık 20000 feet irtifada elde edilmiştir. 20000 feet ile 30000 feet arasında ise türbinin enerjisinin yetmemesi sebebiyle turbo hızı artmaya devam edememiştir. Bu nedenle düzeltilmiş kütleli hava debisi ve basma oranı da daha fazla yükselmemiştir. Dolayısıyla 20000 feet’den daha yüksek irtifalarda maksimum motor gücündeki düşüş hızlanmaktadır.



Şekil 5.8. 5500 rpm motor hızında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar turboşarj kompresör çalışma noktaları

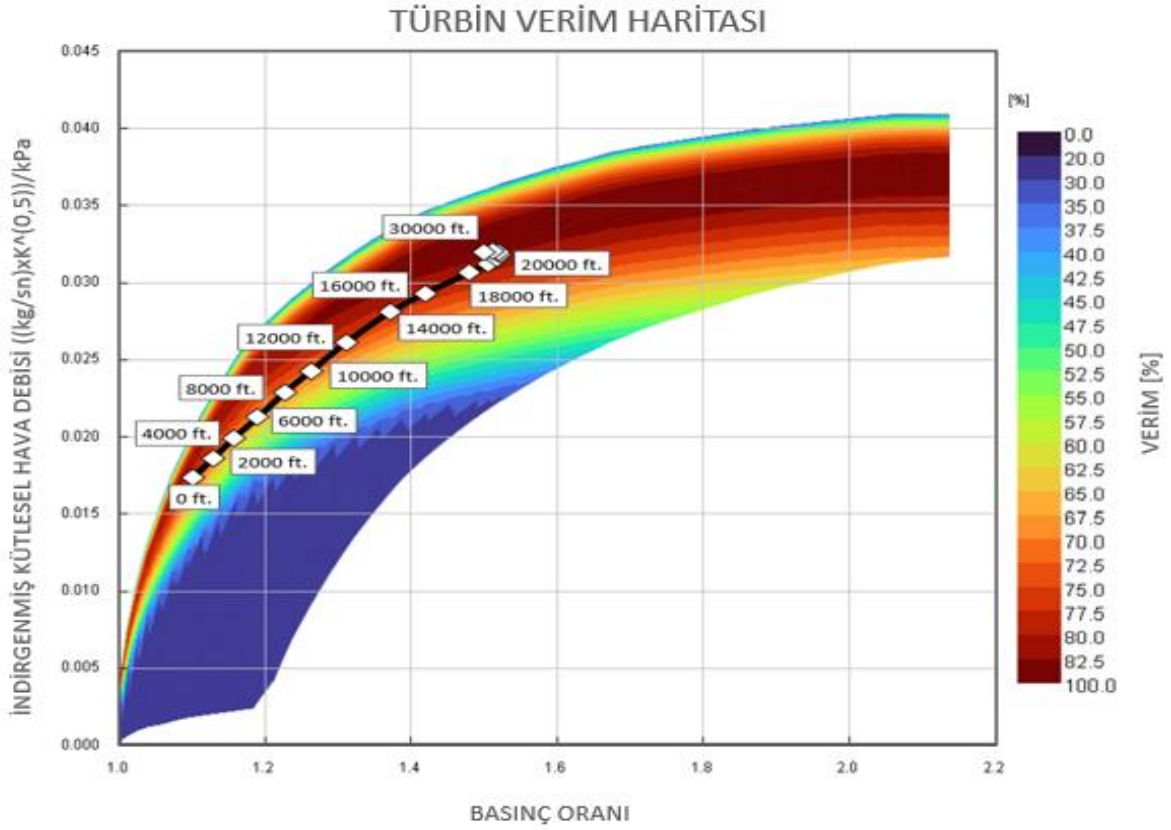
Şekil 5.9’da Çeşitli motor hızlarında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar tahliye hattı açıklık miktarı gösterilmiştir. Tahliye hattı toplam çapı 35 mm’dir. Motor devri arttıkça tahliye hattının açıklık miktarı artmaktadır çünkü egzoz gazı

enerjisinin momentumu artmakta ve daha az egzoz gazı türbini çevirmeye yetmektedir. Bu sebeple tahliye hattı açılır ve gereksiz egzoz gazı enerjisi atmosfere tahliye edilir. Ancak 22000 feet irtifadan daha yüksek irtifalarda tüm motor devirlerinde tahliye hattı tamamen kapanır, egzoz gazının enerjisinin kompresörün talep ettiği enerjiyi karşılayamadığı anlaşılmaktadır. Bu durum yüksek irtifalarda motorun güç kaybetmesinin sebeplerinden birisidir.



Şekil 5.9. Çeşitli motor hızlarında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar tahliye hattı açıklık miktarı

Şekil 5.10'da 5500 rpm motor hızında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar turboşarj türbin çalışma noktaları gösterilmiştir. Türbinin çalışma bölgesi boyunca, deniz seviyesinden 20000 feet'e kadar hem indirgenmiş kütleli hava debisi, hem de basınç(genleşme) oranı artış gösterir. Türbin verimi değişiklikler gösterse de tüm devirlerde yaklaşık ortalama %75 bölgesinde çalışmaktadır. 20000 ile 30000 feet arasında ise türbin basınç oranı ve indirgenmiş kütleli hava debisi artışına devam edememiş ve limitine ulaşmıştır. Bu irtifadan daha yüksek irtifalarda enerjisinin yetmemesi sebebiyle kompresörü daha fazla besleyememiş ve maksimum motor gücünün düşmesine sebep olmuştur.

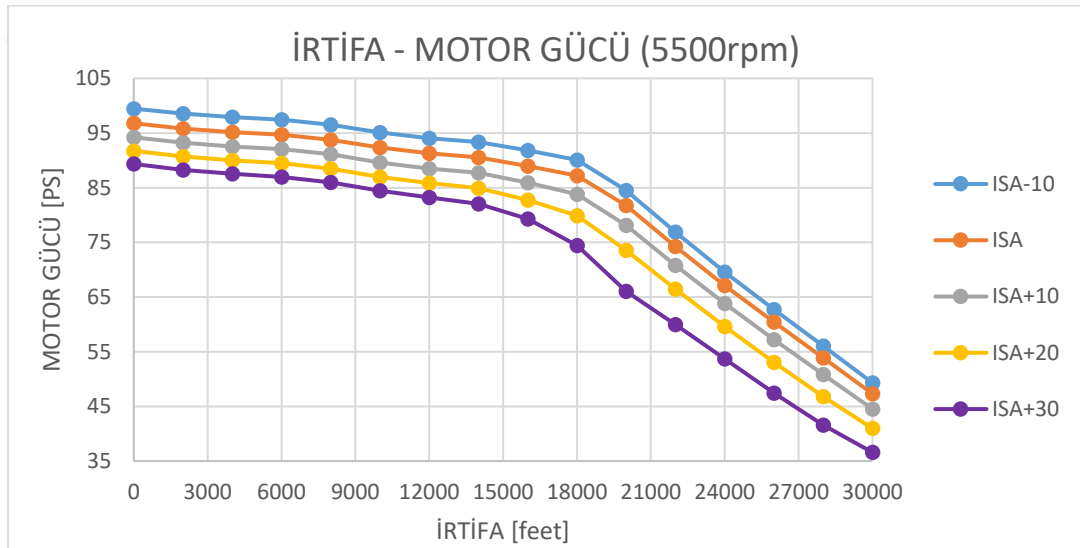


Şekil 5.10. 5500 rpm motor hızında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar turboşarj türbin çalışma noktaları

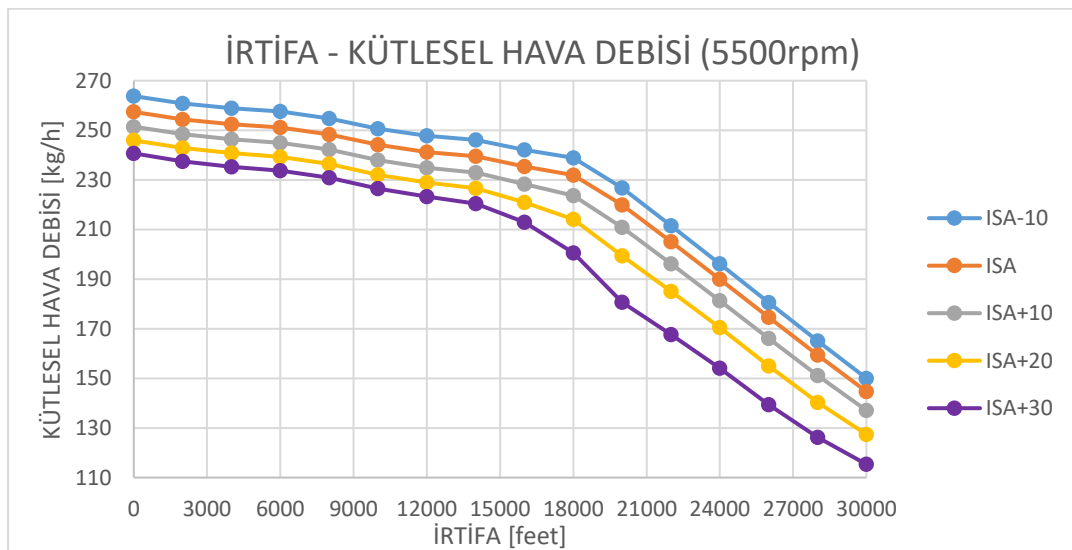
5.3 Standart Atmosfer Sıcaklığından Farklı Sıcaklıklarda Motor Performansı

İrtifa arttıkça ortam basıncı ve sıcaklığı düşer. Bölüm 4.3.2’de bu parametrelerin her ikisinin de etkileri dolaylı olarak irtifa değişikliği açısından ele alınmıştır. Bölüm 4.3.2’de irtifaya karşı sıcaklık değişimi için ISA koşulunun benimsendiğini belirtmek önemlidir. Örneğin ISA koşulunda deniz seviyesi sıcaklığı 15°C’dir ve deniz seviyesinin gerçek sıcaklığı ISA’dan daha büyük veya daha düşükse, Bölüm 4.3.2’nin sonuçları geçerliliğini yitirmektedir. Başka bir deyişle, yılın sıcak ve soğuk günlerinde ortam sıcaklığındaki değişikliklerin motorun performansı üzerindeki etkisi, ISA durumuna göre irtifa değişikliği nedeniyle ortam sıcaklığı değişikliklerinin etkisinden belirgin şekilde farklıdır, motor performansını ve kısıtlamaları önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle bu bölümde 1 boyutlu model kullanılarak motorun nominal hızında(5500 rpm) 30000 feet’e kadar ISA’dan ortam sıcaklığı farkının performans parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de görüldüğü gibi, irtifaya bağlı güç ve kütleli hava debisi farklı sıcaklıklarda aynı eğilimleri gösterir. Ayrıca deniz seviyesinde ortam sıcaklığındaki 40°C’lik bir değişiklik, motor gücünde ve kütleli hava debisinde sırasıyla %10,2 ve %8,8 oranında önemli bir azalmaya neden olur. 30000 feet irtifada ise yine ortam sıcaklığındaki 40°C’lik bir değişiklik, motor gücünde ve kütleli hava debisinde sırasıyla %25,8 ve %23,1 oranında azalmaya neden olur. Bu değerler daha alçak irtifalara kıyasla yüksek irtifalarda sıcaklık farkının motor gücü ve kütleli hava debisi üzerine etkisinin daha büyük olduğunu göstermektedir.

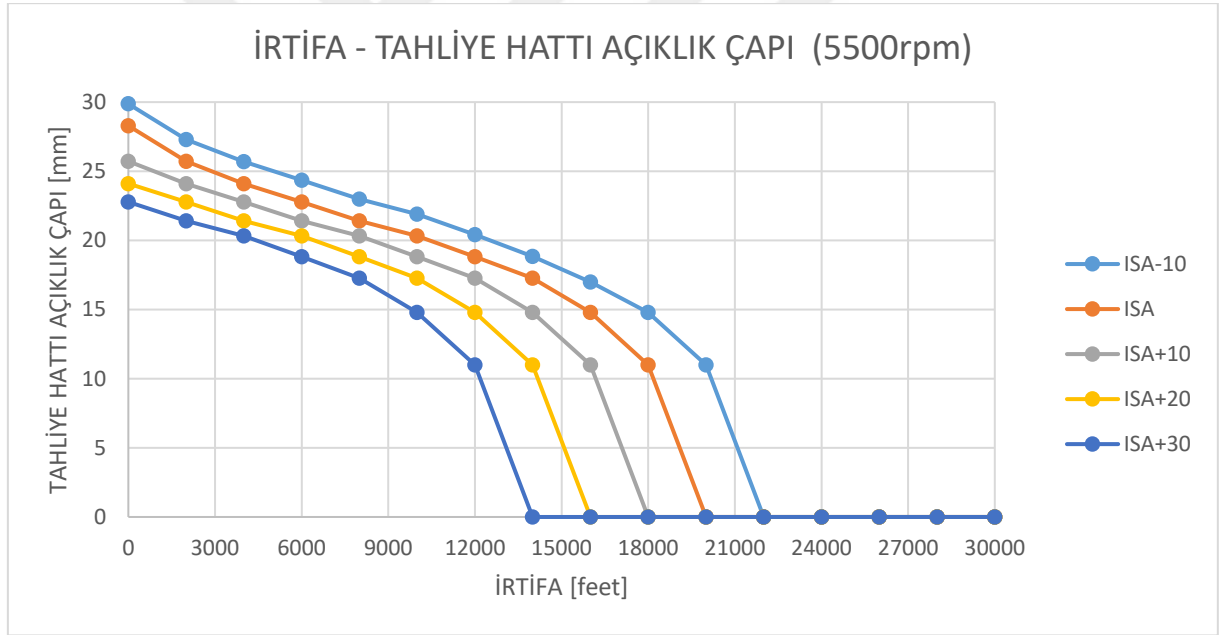


Şekil 5.11. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı motor gücü değişimi



Şekil 5.12. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı kütleli hava debisi değişimi

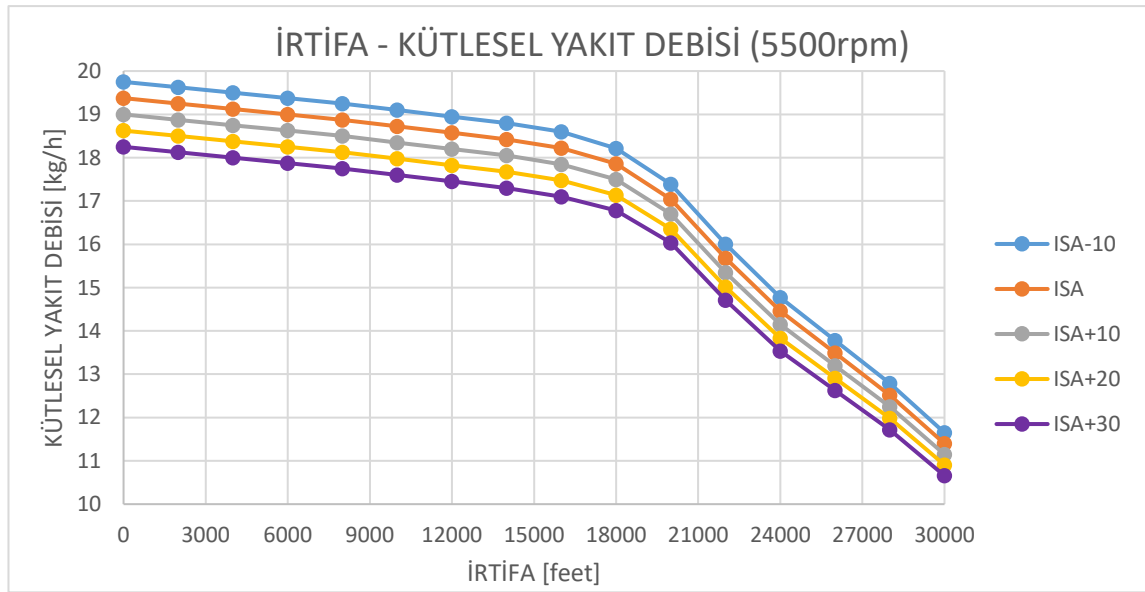
Şekil 5.13’de 5500 rpm’de, çeşitli ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar tahliye hattı açıklık miktarı gösterilmiştir. Tahliye hattı toplam çapı 35 mm’dir. Ortam sıcaklığı düştükçe tahliye hattının açıklık miktarı artmaktadır çünkü havanın yoğunluğunun düşmesi sayesinde egzoz gazının da enerjisi ve momentumu artmaktadır. Daha az egzoz gazı türbini çevirmeye yetmektedir. Bu sebeple tahliye hattı açılır ve gereksiz egzoz gazı enerjisi atmosfere tahliye edilir. Ancak 22000 feet irtifadan daha yüksek irtifalarda tüm ortam sıcaklıklarında tahliye hattı tamamen kapanır, egzoz gazının enerjisinin kompresörün talep ettiği enerjiyi karşılayamadığı anlaşılmaktadır. Bu durum yüksek irtifalarda motorun güç kaybetmesinin sebeplerinden birisidir. Bu etken yüksek sıcaklıklarda daha da fazla gözükmemektedir. Bu sebeple en zorlayıcı uçuş koşulları en yüksek irtifada ve en sıcak günlerde gerçekleşmektedir.



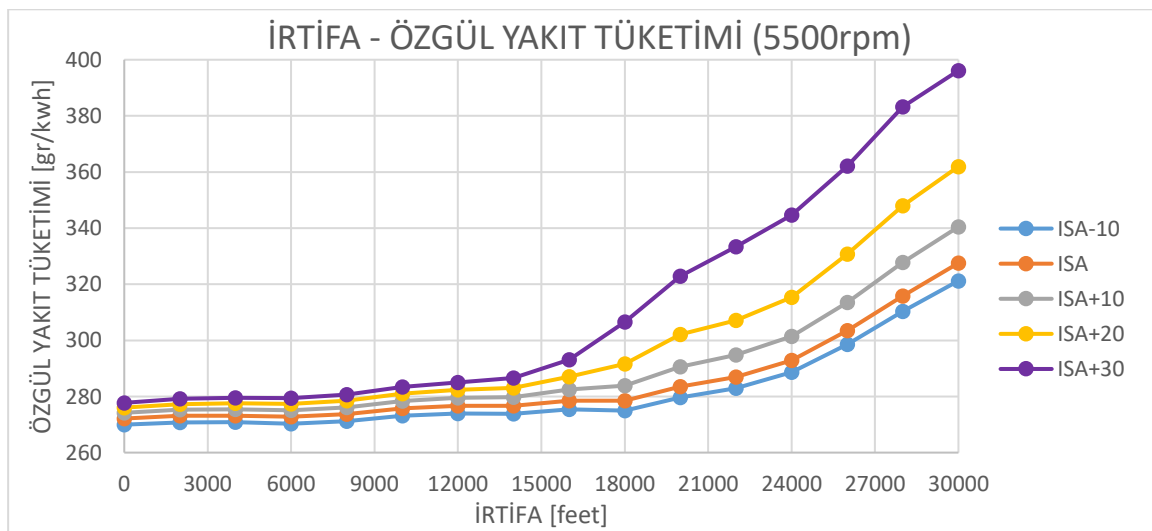
Şekil 5.13. Çeşitli motor hızlarında, ISA şartlarında, deniz seviyesinden 30000 feet irtifaya kadar tahliye hattı açıklık miktarı

Farklı motor devirlerinde yakıt hava karışımı oranının sabit tutulmaya çalışılması nedeniyle, Şekil 5.14’de görüldüğü gibi kütleli yakıt debisi değişimi, Şekil 5.12’deki kütleli hava debisi değişim grafiği ile benzer eğilim göstermektedir. Ortam sıcaklığında 40°C’lik bir artışla kütleli yakıt debisi %9 azalmakta, 30000 feet irtifaya çıkıldığında ise ISA0 sıcaklığında deniz seviyesine göre kütleli yakıt debisi %41 azalmaktadır. Şekil

5.15'de gösterildiği gibi, ortam sıcaklığında 40°C'lik bir artışla özgül yakıt tüketimi yalnızca yaklaşık %2,8 oranında artmaktadır. Başka bir deyişle, deniz seviyesinde ve düşük irtifalarda sıcaklık farkının motor özgül yakıt tüketimindeki etkisi görece düşüktür. Öte yandan, 30000 feet irtifada ise ortam sıcaklığında 40°C'lik bir artışla, özgül yakıt tüketimi yaklaşık %19 oranında artmaktadır. Bu durum bize yüksek irtifalarda sıcaklık farklarının motor özgül yakıt tüketimindeki etkisinin daha etkili olduğunu göstermektedir.

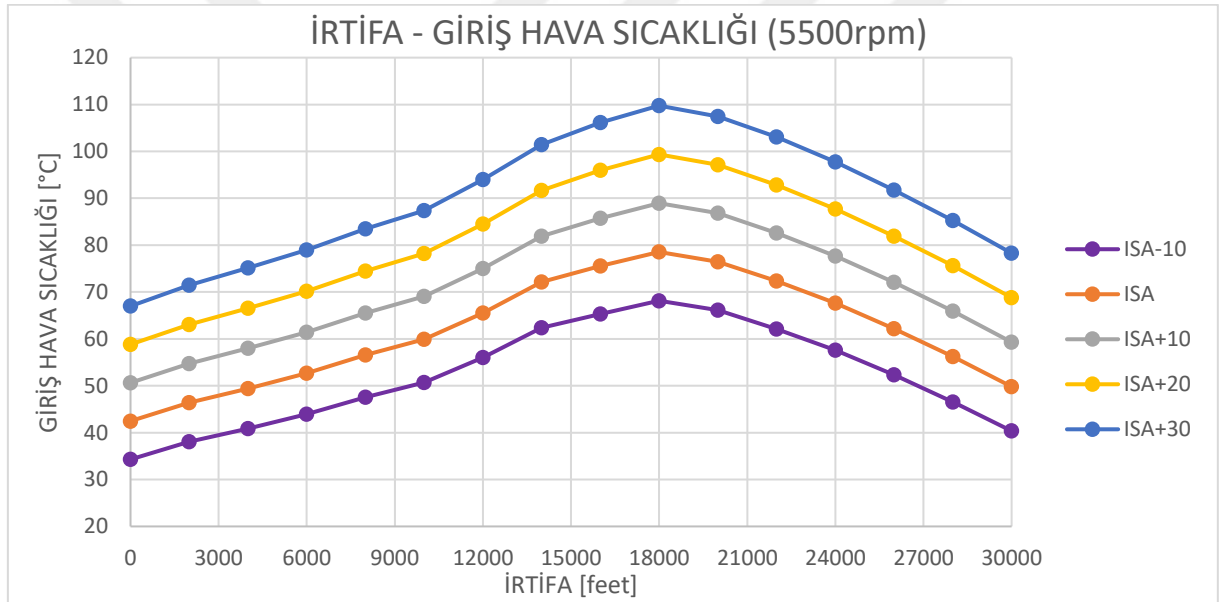


Şekil 5.14. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı kütleli yakıt debisi değişimi



Şekil 5.15. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi

Şekil 5.16'da açıkça görüldüğü gibi, hava hattında turboşarj sonrası emme manifoldu giriş havası sıcaklığı, kompresör basma oranına bağlı olarak 18000 feet'de maksimuma ulaşmaktadır. Bununla birlikte, irtifa arttıkça dış ortam sıcaklığı azalmaktadır. Başka bir deyişle, irtifa değişimi ile kompresör basma oranının giriş hava sıcaklığını ısıtma etkisi, ortam sıcaklığının düşmesinin giriş hava sıcaklığını soğutma etkisinden daha büyüktür. Yaklaşık 18000 feet irtifada kompresör basma oranı maksimuma ulaştığı için bu irtifadan sonra giriş hava sıcaklığının artışı durmaktadır ve hatta dış ortam sıcaklığının soğumasıyla birlikte giriş hava sıcaklığı da 18000 feet irtifadan daha yüksek irtifalarda soğumaya başlar.

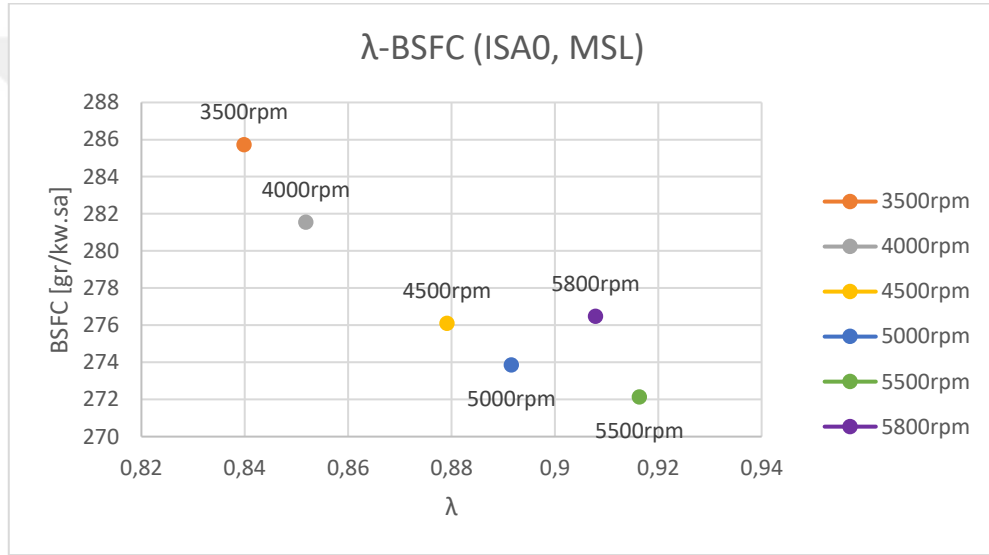


Şekil 5.16. Beş farklı ISA sıcaklığında irtifaya bağlı giriş hava sıcaklığının değişimi

5.4 Yakıt Hava Karışımına Bağlı Özgül Yakıt Tüketiminin Araştırılması

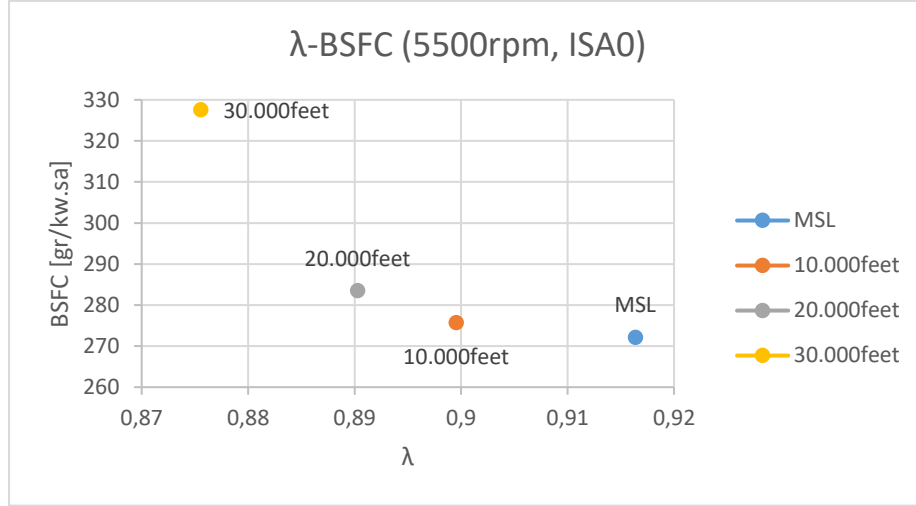
Şekil 5.17'de standart atmosfer sıcaklığında, deniz seviyesinde, çeşitli motor devirlerinde λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi gösterilmiştir. Motor devri 5500 rpm'den 3500 rpm'e kadar azaldıkça λ azalmakta, turbo besleme ünitesinin türbini yeterince enerjilendirilemediği için kütleli hava debisi düşmekte, yakıt hava karışımı zengine kaymakta, motor yeterince hava alamamakta ve buna bağlı olarak yanmanın idealden uzaklaşmasıyla özgül yakıt tüketimi de yükselmektedir. Bu durumda bir istisna

vardır ki o da 5800 rpm motor hızında λ 5500 rpm'dekine göre daha düşük, özgül yakıt tüketimi ise daha yüksektir. Bu durumun sebebi de çalışmanın önceki bölümlerinde de bahsedildiği gibi, motorun indike motor veriminin 5500 rpm'de 5800 rpm'e göre daha yüksek olmasıdır. Motor 5800 rpm'de iken yalnızca 5 dakika boyunca maksimum gücünü verebildiği ve motorun daimi maksimum gücünü 5500 rpm'de ürettiği bilinmektedir. Bu durumda 5800 rpm motor hızı istisnası haricinde, motor hızının düşmesiyle ve λ değerinin idealden uzaklaşmasıyla özgül yakıt tüketimi artmaktadır. Rotax 914 motoru için en düşük özgül yakıt tüketimi değerinin 5500 rpm motor hızında sağlanmaktadır.



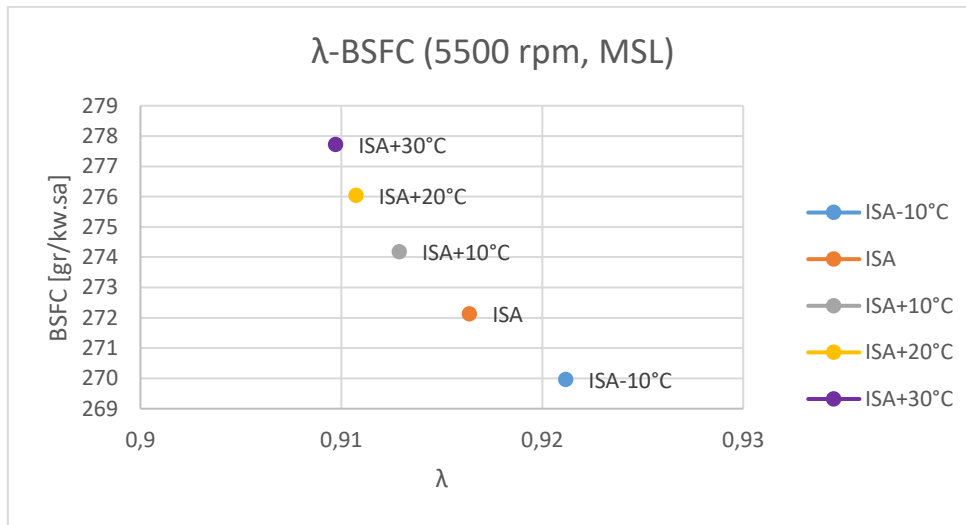
Şekil 5.17. Standart atmosfer sıcaklığında, deniz seviyesinde, çeşitli motor devirlerinde λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi

Şekil 5.18'de 5500 rpm motor hızında, standart atmosfer sıcaklığında, çeşitli irtifalarda λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi gösterilmiştir. İrtifa deniz seviyesinden 30000 feet'e kadar arttıkça havanın yoğunluğunun düşmesine bağlı olarak kütleli hava debisi azaldığı için λ azalmakta, yakıt hava karışımı zengine kaymakta, motor yeterince hava alamamakta ve buna bağlı olarak yanmanın idealden uzaklaşmasıyla özgül yakıt tüketimi de yükselmektedir. Özgül yakıt tüketimindeki artış ise irtifa arttıkça daha da hızlanmıştır. Bu durum önceki bölümde anlatılan irtifaya bağlı kütleli debisinin değişimine paralellik göstermektedir. Rotax 914 motoru için en düşük özgül yakıt tüketimi değeri deniz seviyesinde sağlanmaktadır.



Şekil 5.18. 5500 rpm motor devrinde, standart atmosfer sıcaklığında, çeşitli irtifalarda λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi

Şekil 5.19'da 5500 rpm motor devrinde, deniz seviyesinde, çeşitli ortam sıcaklıklarında λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi gösterilmiştir. Ortam sıcaklığı arttıkça havanın yoğunluğunun düşmesine bağlı olarak kütleli hava debisi azaldığı için λ azalmakta, yakıt hava karışımı zengine kaymakta, motor yeterince hava alamamakta ve buna bağlı olarak yanmanın idealden uzaklaşmasıyla özgül yakıt tüketimi de yükselmektedir. Rotax 914 motoru için en düşük özgül yakıt tüketimi değeri analiz edilen sıcaklıklar arasında en düşük sıcaklık olan ISA-10°C'de sağlanmaktadır.



Şekil 5.19. 5500 rpm motor devrinde, deniz seviyesinde, çeşitli ortam sıcaklıklarında λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi değişimi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Rotax 914 motoru GT POWER programı aracılığıyla 1 boyutlu olarak modellenmiştir. Bir boyutlu modeli doğrulamak için analiz sonuçları 16000 feet'e kadar üretici test verileriyle karşılaştırılmış ve modelin doğruluk payı ortaya çıkarılmıştır. Motor performansı 30000 feet'e kadar farklı sıcaklıklarda analiz edilmiştir. Bu amaçla, motor beygir gücü, giriş hava debisi, özgül yakıt tüketimi, kompresör ve turboşarj performans eğrileri, hacimsel verim ve belirtilen verimdeki değişimler analiz edilmiştir. 16000 feet irtifanın üzerindeki irtifalarda çalışma koşullarını belirlemenin yanı sıra, giriş havası koşullarını değiştirerek motor performansını iyileştirmek için GT-Power programı kullanılabilir. Aşağıda farklı uçuş açılarından bazı gözlemler özetlenmiştir.

Motor gücü, ortam hava yoğunluğunda %43'lük bir düşüşe rağmen nominal hızda 18000 feet'e kadar yalnızca yaklaşık %10 azalmıştır. 18000 feet'den 30000 feet'e hava yoğunluğunda %34 azalma ile motor gücü yaklaşık %46 azalmıştır. Bu durum turboşarj ünitesinin 18000 feet'in üzerindeki irtifalarda motorun potansiyeli olan kütleli hava miktarını karşılayamadığını göstermektedir. Başka bir deyişle, turboşarj kompresörünün türbini üzerinden geçen enerji yaklaşık 18000 feet irtifada limitine ulaşmış ve kompresör ünitesinden daha yüksek miktarda kütleli hava debisini, daha yüksek basınçlara sıkıştıramamıştır. Bu irtifadan daha yüksek irtifalarda tahliye hattının kapanmasına rağmen motora daha fazla kütleli hava debisi sağlanamamıştır ve böylece irtifa yükseldikçe giriş havası debisi aşırı bir düşüş yaşamıştır. Yüksek irtifalardaki performans parametreleri kaybı ve güç azalması, yüksek motor hızlarında egzoz gazı momentumunun yeterli olmamasıyla ilişkilendirilebilir.

ISA koşullarına göre ortam sıcaklığındaki 40°C'lik bir artışla güç, nominal hızda (5500 rpm) deniz seviyesinde yaklaşık %10,2, 30000 feet irtifada ise %25,8 azalmıştır. Ek olarak, ortam sıcaklığındaki 40°C'lik artış özgül yakıt tüketimi üzerinde deniz seviyesinde %2,8 artış gibi küçük bir etki gösterse de, 30000 feet irtifada bu artış miktarı %19

olmuştur. Bu sonuçlar mevcut turboşarj sistemi ile sıcak günlerde uçuş gereksinimlerine daha fazla dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir.

İrtifanın artmasıyla ortam sıcaklığının azalmasına rağmen turboşarj sisteminin kompresör ünitesinin basma oranı arttığı için giriş hava sıcaklığı deniz seviyesinden 18000 feet irtifaya kadar yükselmektedir. ISA+30 koşullarında 18000 feet irtifada giriş hava sıcaklığı 109°C'ye kadar çıkmaktadır. ISA-10 koşulları altında 30000 feet yükseklikte ise yaklaşık 40°C'ye ulaşmıştır. Rotax-914 motorunda istenmeyen yanma ve motor vuruntusunu önlemek için izin verilen maksimum giriş havası sıcaklığının 88°C olduğu göz önüne alındığında, motor ISA+10'dan daha yüksek sıcaklık şartlarında 5500 rpm motor devriyle tırmanırken, bazı irtifalarda üretici tarafından limitlenmiştir. Bu sınırlamalar sebebiyle pilot gaz kolunu düşürmek ve motoru daha düşük performansta kullanmak zorunda kalır. Bu durum da daha yavaş tırmanma, daha düşük faydalı yük kapasitesi gibi dezavantajlara sebep olur. Bu sıcaklık limiti nedeniyle sıcak günlerde tırmanış fazında giriş havasının soğutulması gereklidir. Rotax-914 motorunun uygun bir ara soğutucu ile kullanılması durumunda giriş hava sıcaklığının tüm koşullarda 88°C'nin altına düşürülmesi ve motorun en yüksek performans ihtiyacı olan tırmanma fazında da gaz kolu limiti ortadan kaldırılarak teknik dezavantajların giderilmesi ihtiyacı ortaya konmuştur. Bahse konu olan uygun ara soğutucunun tasarım parametreleri ayrı bir çalışmanın konusu olabilir ve bu çalışmanın devamı niteliğinde geliştirilebilir.

Sonuçlara göre Rotax-914 motoru ile uçak tırmanışı için en uygun hız yaklaşık 5500 rpm'dir. Sadece farklı irtifalarda maksimum sürekli gücü ve en iyi tırmanma oranını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tırmanma senaryosunda minimum özgül yakıt tüketimini de sağlar. Bu durumun bir önemli sebebi de motorun tırmanma aşamasında 5500 rpm'deki performansı esnasında turboşarj kompresör çalışma noktasının da dalgalanma ve tıkanma hatlarından uzakta, yüksek verimli bölgede çalışıyor olmasıdır.

Çeşitli motor hızı, irtifa ve ortam sıcaklığı koşulları altında λ 'ya bağlı özgül yakıt tüketimi de ayrıca ele alınmıştır. Rotax 914 motoru için en düşük özgül yakıt tüketimi 5500 rpm motor hızında, deniz seviyesinde ve analiz edilen en soğuk koşul olan ISA-

10°C’de sağlanmaktadır. Öte yandan λ 1’den daha düşük çeşitli koşullar incelenmiş, motora giren hava yakıt karışımının daha da zengin karışıma kayması da motorun verimini olumsuz etkileyerek özgül yakıt tüketiminin yükselmesine sebep olmuştur. 4 zamanlı turbo beslemeli benzinli pistonlu motorlarda zengin yakıt hava karışımına sahip çalışma koşulları için λ yükseldikçe özgül yakıt tüketiminin düştüğü gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında Rotax-914 motoru modellenerek, pistonlu havacılık motorunun performans parametreleri detaylıca analiz edilmiştir. Modeli geliştirmek ve iyileştirmek için turboşarj kompresör ve türbin bileşenlerinin çalışma bölgeleri turboşarj üreticisinin veya diğer turbo makineler test kuruluşlarının test sonuçlarıyla doğrulanarak ve turbo test sonuçları kullanılarak daha hassas ve yüksek doğrulukla modellenebilir. Silindir içindeki yanma ve ısı transfer modelleri daha yüksek hassasiyette modellenebilir. Kullanılan GT POWER programında karbüratör modelleme aracı mevcut olmadığı için emme manifolduna enjektör modellenmiş ve karbüratör karakteristiği elde edilmeye çalışılmıştır. Modellenen karbüratör sonuçları gerçek karbüratör testleriyle karşılaştırılarak geliştirilebilir. Daha gelişmiş sürtünme modelleri de kullanılabilir. Hava aracına entegre edilen motorun uçuş görev profili ve tırmanışının ayrıntılı analiz edilebilmesi amacıyla motor(varsa dişli kutusu) ve pervane gibi tüm tahrik sistemi kapsamlı bir şekilde modellenebilir ve GT-Power'daki motor modeliyle birleştirilerek görev profili dahilinde çevrim koşturularak analiz edilebilir. Ayrıca farklı λ ve özgül yakıt tüketimi koşulları altında çeşitli görev profillerinde analiz programında farklı çevrimler koşturularak özgül yakıt tüketimi ve λ 'nın ilgili görev profilleri için ne kadar yakıt tasarrufu sağladığı da ayrı bir çalışma kapsamında araştırılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Amiel, R., Tartakovsky, L., 2016, Effect of Flight Altitude on the Knock Tendency of SI Reciprocating Turbocharged Engines, SAE Technical Paper 2016-32-0006.
- Anonim, 1998, 2 stroke engine, https://www.trms.org.au/rm_engine_diesel_page.htm.
- Anonim, 1999, <https://www.digitaldutch.com/atmoscalc/table.htm>, Standard Atmosphere Calculator.
- Anonim, 2015, 4 zamanlı motor, <http://elektromot.com/otomobil-motor/4-zamanli-motor/>, erişim tarihi: 27.07.2015.
- Anonim, 2018, <https://otomobilteknoloji.blogspot.com/2016/06/turbo-wastegate-nedir-ne-ise-yarar-arizasi-ayari.html>, 2021, Turbo Wastegate Nedir Ne İşe Yarar?
- Anonim, 2021, <https://www.kraftwerk-shop.cc/Whipple-Supercharger-Kit-RAM-57-2019>, 2021, Whipple Supercharger Kit RAM 5.7 2019+.
- Anonim, 2021, <https://www.turbosquid.com/3d-models/3d-model-gtx3584r-turbocharger-garrett-1243645>, 2021, 3D model Garrett GTX3584R Turbocharger.
- BRP Powertrain ROTAX, 2019, Operators Manual For Rotax Engine Types 914 Series, erişim tarihi: 01.08.2019
- BRP Powertrain ROTAX, 2020, 914 UL F Technical Datasheet, https://www.flyrotax.com/files/Bilder/Produkte%20Rotax/Datasheets/914%20UL_Datasheet_2020.pdf, erişim tarihi: 01.2020
- Carlucci, A., Ficarella A., Laforgia D., Renna A., 2015, Supercharging system behavior for high altitude operation of an aircraft 2-stroke Diesel engine, Energy Conversion and Management 101 (2015).
- Çelik, S., 2021, İçten Yanmalı Motorlar Ders Notları, Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, s. 6-7.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Emekli, M., Özgül, E., 2014, Motor Kontrolü Uygulamaları İçin Çift Kademeli Aşırı Doldurma Sistemine Sahip Bir Dizel Motorun Modellenmesi, Mühendis ve Makine, Cilt: 55, Sayı: 659, 50-64, 21.11.2014.

Erbay, L.B., Yavuz H., 1999, Optimization Of The Irreversible Stirling Heat Engine, International Journal Of Energy Research, 23, p. 863-873, 04.12.1998

Federal Aviation Administration, 2020, Hypoxia, Aerospace Medical Education Division, <https://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/hypoxia.pdf>, erişim tarihi: 29.04.2020

Garrett, 2019, Turbo Tech 103 | Expert: Compressor Mapping, https://www.garrettmotion.com/wp-content/uploads/2019/10/GAM_Turbo-Tech-103_Expert-1.pdf.

Hashmi, K., Radhakrishna, D., 2015, Prediction of High Altitude Performance for UAV Engine, SAE Technical Paper 2015-26-0207.

Hernandez, A., 1999, Idealized four-stroke cycle of Diesel (a) and Otto (b) heat engines, https://www.researchgate.net/figure/Idealized-four-stroke-cycle-of-Diesel-a-and-Otto-b-heat-engines-In-both-cases_fig2_231134292.

Heywood, J., 1988, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Inc.

I.Gamma Technologies, 2013, GT-Power Engine Simulation Software Manual, 2013.

Khodaparast, M., Bozorg, M., Kheradmand, S., 2016, Keeping twin turbocharged engine power at flight altitudes, Aircraft Engineering and Aerospace Technology 11-2016-0200.

Li, H., Shi, L., Deng, K., 2015, Development of turbocharging system for diesel engines of power generation application at different altitudes, Journal of the Energy Institute 89 (2016).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Luongo, A., Nuccio, P., 2006, Optimization of a Light Aircraft Spark-Ignition Engine, SAE Technical Paper Series 2006-01-2420.
- Mansouri, H., Ommi, F., 2019, Performance prediction of aircraft gasoline turbocharged engine at high altitudes, Applied Thermal Engineering 156 (2019), s. 587-596.
- Miller, J., Hoke, J., Schauer, F., 2014, Effect of Unsteady Flow on Intercooler Performance, SAE Technical Paper 2014-01-2220.
- Perez, P., Boehman, A., 2009, Performance of a single-cylinder diesel engine using oxygen-enriched intake air at simulated high-altitude conditions, Aerospace Science and Technology 14 (2010).
- Sekiz Silindir, 2016, <https://www.sekizsilindir.com/2016/07/turbo-motorlarda-intercooler-ne-ise.html>, 2016, Turbo motorlarda intercooler ne işe yarar?, erişim tarihi: 20.07.2016.
- Shojaefard, A., Danamanesh, H., 2012, Comparison of application models friction and combustion in spark ignition engine, J. Automot. Eng. Related Ind. 123 (2012) s. 30–34.
- Wang, X., Ge, Y., Yu, L., Feng, X., 2013, Effects of altitude on the thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine, Energy 59 (2013), s. 543-548.
- Wilkinson, R., Benway, R., 1991, Liquid Cooled Turbocharged Propulsion System for HALE Application, The American Society Of Mechanical Engineers 91-Gt-399.
- Yang, M., Gu, Y., Deng, K., Yang, Z., Zhang., Y, 2017, Analysis on altitude adaptability of turbocharging systems for a heavy-duty diesel engine, Applied Thermal Engineering 128 (2018), s. 1196-1207.
- Yang, M., Gu, Y., Deng, K., Yang, Z., Liu, S., 2017, Influence of altitude on two-stage turbocharging system in a heavy-duty diesel engine based on analysis of available flow energy, Applied Thermal Engineering 129 (2018).

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A

Çalışma kapsamında SI birim sistemi kullanılmıştır ancak havacılık sektöründe yaygın olarak kabul gören irtifa birimi feet olduğu için irtifa birimi olarak metre yerine feet kullanılmıştır. Metre – feet birim dönüşümü istendiği takdirde aşağıdaki 7.1 numaralı denklemdeki gibi gerçekleştirilebilir (Anonim, 1999);

$$m = \frac{ft}{3,2808} \quad (7.1)$$

Çalışma kapsamında geçen tüm feet cinsinden irtifalar aşağıdaki tabloda metre birimine çevrilmiş hali Çizelge A.1’de yer almaktadır. Ayrıca Çizelge A.1’de çalışma kapsamında mevcut olan tüm irtifalar için standart atmosfer sıcaklığı, atmosfer basıncı ve havanın yoğunluğu da yer almaktadır.

Çizelge A.1: Feet-Metre birim dönüşümü ve irtifaya bağlı ISA, atmosfer basıncı ve havanın yoğunluğu (Anonim, 1999).

	İRTİFA		STANDART ATMOSFER SICAKLIĞI (ISA) °C	ATMOSFER BASINCI mBar	HAVANIN YOĞUNLUĞU kg/m ³
	Feet	Metre			
1	0	0	15,0	1013,2	1,225
2	2000	609,6	11,0	942,1	1,155
3	4000	1219,2	7,1	875,1	1,088
4	6000	1828,8	3,1	812,0	1,024
5	8000	2438,4	-0,8	752,6	0,963
6	10000	3048,0	-4,8	696,8	0,905
7	12000	3657,6	-8,8	644,4	0,849
8	14000	4267,3	-12,7	595,2	0,796
9	16000	4876,9	-16,7	549,2	0,746
10	18000	5486,5	-20,6	506,0	0,698
11	20000	6096,1	-24,62	465,6	0,653
12	22000	6705,7	-28,6	427,9	0,610
13	24000	7315,3	-32,5	392,7	0,569
14	26000	7924,9	-36,5	359,9	0,530
15	28000	8534,5	-40,5	329,3	0,493
16	30000	9144,1	-44,4	300,9	0,458