

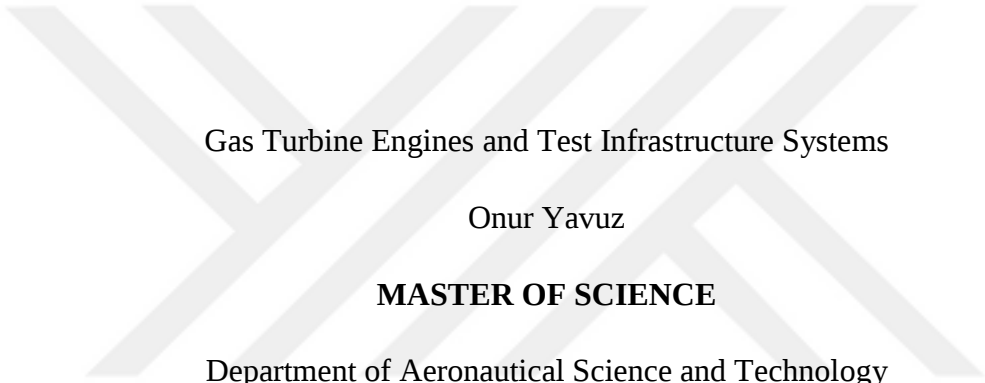
Gaz Türbinli Motorlar ve Test Altyapı Sistemleri

Onur Yavuz

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Ocak 2024



Gas Turbine Engines and Test Infrastructure Systems

Onur Yavuz

MASTER OF SCIENCE

Department of Aeronautical Science and Technology

January 2024

Gaz Türbinli Motorlar ve Test Altyapı Sistemleri

Onur Yavuz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Selim Gürgen

Ocak 2024

ONAY

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Onur Yavuz**'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Gaz Türbinli Motorlar ve Test Altyapı Sistemleri” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç Dr. Selim Gürgen

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Selim Gürgen

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Seyid Fehmi Diltemiz

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Fatih Bozkurt

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

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Selim Gürgen danışmanlığında hazırlamış olduğum “Gaz Türbinli Motorlar ve Test Altyapı Sistemleri” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel 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.
12/01/2024

Onur Yavuz

İmza

ÖZET

Gaz türbinli motorlar, havanın sıkıştırılması, ısınması, yakıtla karıştırılması ve nihayetinde yüksek basınçlı gazın bir türbin üzerinde genişlemesi prensibine dayanan termal enerji dönüşüm sistemleridir. Bu motorlar, genellikle hava araçlarında, enerji santrallerinde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Motorun performansını test etmek ve optimize etmek için ise uygun bir test altyapı sistemine ihtiyaç duyulur. Gaz türbinli motorların test altyapı sistemleri, motorun çeşitli çalışma koşullarında nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek amacıyla tasarlanırlar. Bu sistemler, motorun çeşitli yük ve hız koşullarında nasıl tepki verdiğini, verimliliğini ve dayanıklılığını belirlemek için kullanılır.

Test altyapı sistemleri, genellikle dinamometreler, veri toplama sistemleri, yağlama sistemi, yakıt sistemi, motor başlatma sistemleri ve kontrol haberleşme altyapı sistemleri gibi bileşenleri içerir. Dinamometreler, motordan üretilen torku ve gücü ölçerek performansı değerlendirir. Veri toplama sistemleri, motorun çeşitli parametrelerini izleyerek analiz için veri sağlar. Yakıt ve yağlama sistemleri, motora gereken yakıtı ve yağı temin eder. Motor başlatma sistemleri, yanma sistemine yakıtla karışması için başlangıçta gerekli havayı sağlamak için bir devir hızına kadar döndürmek için gereklidir. Haberleşme ve kontrol altyapı sistemi, test sistemlerinin kendi aralarında ve kontrol odasındaki HMI arayüzü ile etkileşimini sağlar. Bu test altyapı sistemleri, motor üreticilerine, tasarımcılara ve bakım uzmanlarına, motorların güvenilirliğini artırmak, verimliliği optimize etmek ve performanslarını değerlendirmek için önemli veri girdisi sağlar.

Anahtar Kelimeler: Gaz türbinli motorlar, motor test, test altyapı, havacılık, turboşaft.

SUMMARY

Gas turbine engines are thermal energy conversion systems based on the principle of compressing, heating, mixing with fuel, and ultimately expanding high-pressure gas on a turbine. These engines are commonly used in aircraft, power plants, and industrial applications. However, to test and optimize the performance of the engine, an appropriate test infrastructure system is required. The test infrastructure systems for gas turbine engines are designed to assess how the engine performs under various operating conditions. These systems are utilized to determine how the engine responds to various load and speed conditions, as well as to evaluate its efficiency and durability.

Test infrastructure systems typically include components such as dynamometers, data acquisition systems, lubrication systems, fuel systems, motor starting systems, and control communication infrastructure. Dynamometers evaluate performance by measuring the torque and power produced by the engine. Data acquisition systems provide data for analysis by monitoring various parameters of the engine. Fuel and lubrication systems supply the required fuel and oil to the engine. Motor starting systems are essential for rotating the engine at a speed necessary for the initial mixing of fuel with air in the combustion system. The communication and control infrastructure enables interaction among test systems and with the HMI interface in the control room. These test infrastructure systems play a crucial role in providing significant data input to engine manufacturers, designers, and maintenance experts, aiming to enhance the reliability, optimize efficiency, and evaluate the performance of the engines.

Keywords: Gas turbine engines, engine testing, test infrastructure, aviation, turboshaft.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca, beni yönlendiren, destekleyen ve cesaretlendiren birçok kişiye minnettarlığımı ifade etmek isterim. İlk olarak, tez danışmanım Doç. Dr. Selim Gürgen'e teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin rehberliği ve samimiyeti sayesinde bu çalışmayı başarıyla tamamlamak mümkün oldu. Ayrıca bu süreçte bana sonsuz destek olan aileme minnettarım. Her zaman yanımda olmanız, benim için en büyük güç kaynağı oldu. Sizlerin sevgisi ve inancı olmadan bu süreci başarıyla tamamlayamazdım. Benim bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan ve daima destekleyen başta annem ve babam olmak üzere tüm YAVUZ ailesine teşekkür ederim. Son olarak yoğun çalışma temposu içerisinde tezimin hazırlanması sürecinde bana motivasyon kaynağı olan yakın çalışma arkadaşlarıma ve tüm bu tecrübeyi bana katan ve bir parçası olmaktan gurur duyduğum TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Onur Yavuz

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
3. GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR.....	4
3.1. Turbojet Motorlar	5
3.2. Turboprop Motorlar	5
3.3. Turbofan Motorlar	6
3.4. Turboşaft Motorlar	7
3.4.1. Aksesuarlar ve fonksiyonel gruplar	9
3.4.2. Giriş bölümü	12
3.4.3. Kompresör	13
3.4.4. Yanma odası	16
3.4.5. Gaz jeneratör türbin / Yüksek basınç türbini	18
3.4.6. Güç türbini	19
4. YÖNTEM	20
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	22
5.1. Bina Alt Sistem ve Bremze (Test Odası) Kurulum Süreçleri	22
5.1.1. Test tesisi proje ve sistem entegrasyon altyapısı	22
5.1.1.1. Test tesisi özellikleri	22
5.1.2. Bremze altyapı sistemleri	26
5.1.2.1. Yakıt sistemi	29
5.1.2.2. Yağlama sistemi	34
5.1.2.3. Bremze giriş havası air-inlet	37
5.1.2.4. Dinamometre	39

İÇİNDEKİLER

Sayfa

5.1.2.5. Start & ateşleme sistemi	46
5.1.2.6. Kapalı devre kamera ve TV sistemi	54
5.1.2.7. Acil durum (Emergency) sistemleri	55
5.1.2.8. Motorlarda standart bakım uygulamaları ve dikkat edilmesi gerekenler ...	58
5.1.2.9. Kontrol ve haberleşme sistemi	64
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Gaz türbinli motorlar (Şal, 2021)	4
3.2. TEI tarafından üretilen TJ90 (TEI, 2023).....	5
3.3. HÜRKUŞ’da kullanılan Pratt & Whitney Canada üretimi PT6A-68T turboprop motoru (Rolls-Royce, 2005)	6
3.4. TEI tarafından çalışılan TF6000 (TEI, 2023).....	6
3.5. T700 motoru (TEI, 2023)	8
3.6. Kompresör kanatçığı erezyon ile aşınma (a) ve Türbin kanatçığı tıkanma (b) (Filippone & Bojdo, 2014).....	10
3.7. Motor girişinde oluşan buzlanma örneği (Şal, 2021)	10
3.8. Buz önleme sistemi (Şal, 2021).....	11
3.9. Motor yağlama sistemi (Şal, 2021)	12
3.10. Giriş partikül ayırıcı (Şal, 2021).....	12
3.11. GE T700 motoru eksenel ve radyal kompresör tasarımı (Şal, 2021)	13
3.12. TEI TS1400 2 kademe radyal kompresör (Şal, 2021)	14
3.13. Eksenel ve radyal kompresör (Şal, 2021).....	14
3.14. Kompresör çalışma eğrisi-surge marjini (Şal, 2021).....	15
3.15. VSV mekanizması (Şal, 2021)	16
3.16. Yanma odası konfigürasyonları (Şal, 2021)	17
3.17. Stokiyometrik oran (Şal, 2021)	17
3.18. Güç türbini ve gaz üretici türbin (Yavuz, 2018).....	19
4.1. TEI örnek bremze (Defense Here, 2022).....	26
4.2. Bremze motor-kontrol odası konumu.....	27
4.3. Ateşleme ünitesi/buji (TEI, 2020)	30
4.4. Örnek yakıt şeması (TEI, 2020)	31
4.5. Yakıt akış bölücü sistematığı (TEI, 2020).....	32
4.6. Temsili aksesuar dişli kutusu (TEI, 2020).....	32
4.7. Temsili bremze yakıt sistemi.....	33
4.8. Temsili bremze yağlama sistemi	35
4.9. Bremze hava akış sirkülasyonu	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.10. Hidrolik dinamometre (Lish, 2015).....	41
4.11. A/C dinamometre (Dyno Equip, 2023)	42
4.12. Hava frenli dinamometre (McLean, 2022)	43
4.13. Hava frenli dinamometrenin iç yapısı (McLean, 2022)	43
4.14. Turbojet motorda start sıralandırması (Kurban, 2019a)	46
4.15. Elektrikli starter (Kurban, 2019a).....	48
4.16. Düşük voltajlı elektrikli starter sistemi (Kurban, 2019a)	48
4.17. Havalı starter (Kurban, 2019a)	49
4.18. Test odası (bremze) hava başlatma altyapısı temsili gösterim	50
4.19. Hava çarptırılmalı (impingement) start (Kurban, 2019a).....	51
4.20. Gaz türbini starter (Kurban, 2019a).....	52
4.21. Hidrolik starter (Kurban, 2019a)	52
4.22. Kartriçli starter (Kurban, 2019a)	53
4.23. Iso-propyl-nitrate starter şeması (Kurban, 2019a).....	54
4.24. Modbus master/slave yapısı (Anonim, 2020).....	67
4.25. Modbus TCP/IP protokol şeması (Aydinoğlu, 2016).....	68
4.26. CANBus protokolünün otomotivde kullanımı (Şirin, 2015).....	69
4.27. Profibus protokolleri (Şirin, 2015)	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ADK	Aksesuar Dişli Kutusu
APU	Auxiliary Power Unit (Yardımcı Güç Ünitesi)
AR-GE	Araştırma Geliştirme
DCS	Dağıtılmış Kontrol Sistemi (Distrubuted Control System)
EASA	Avrupa Havacılık Emniyet Ajansı(European Aviation Safety Agency)
FBS	Ön Yatak (Front Frame Structure)
FFD	Yakıt Akış Bölücü (Fuel Flow Divider)
FMU	Ana Yakıt Ünitesi (Fuel Main Unit)
FOD	Yabancı Madde Hasarı (Foreign Object Damage)
HMI	İnsan Makine Arayüzü (Human Machine Interface)
IPS	Giriş Partikül Ayırıcı (Inlet Particle Seperator)
MKÜ	Motor Kontrol Ünitesi
MRO	Bakım, Onarım ve Revizyon (Maintenance, Repair and Overhaul)
PLC	Programlanıır Mantıksal Denetleyici(Programmable Logic Controller)
RBS	Arka Yatak (Rear Frame Structure)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SHGM	Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
TAI	Türk Havacılık ve Uzay Sanayi (Turkish Aerospace Industries)
TEC	Turkish Engine Center
TEI	Tusaş Motor Sanayi (Tusaş Engine Industries)

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Son yıllarda tüm dünyada hava yolu taşımacılığı endüstrisi hem sivil hem de askeri alanda önemli bir artış gösterdi. Havacılık motorları teknolojisi ve kullanımı da aynı şekilde önem kazanmış ve artmıştır. Bu artışın önümüzdeki yıllarda da devam etmesi beklenmektedir. Bu artışlarla birlikte ülkemiz kendi yerli ve milli projelerini geliştirmekle birlikte özellikle MRO faaliyetlerinde de önemli bir yere sahiptir. Tüm bunların kaçınılmaz sonucu olarak ürettiğiniz motor bütününe veya parçalarının test edilmesi MRO işlemleri sonucunda büyük öneme sahiptir. Özellikle kendi özel projelerinizde test kabiliyetine sahip olmanız sektörde bir adım önde olma şansını da yanında getirecektir. Aksi takdirde üretilen bir komponenti veya motoru yurt dışında yüksek maliyetlere ve proje gizliliğinden de feragat ederek test ettirmek zorunda kalınacaktır. Bu süreç hem proje takvim sürecini doğrudan etkileyecek hem de proje maliyetinin artmasına yol açacaktır. Bu sebeple AR-GE faaliyetleri açısından da üretilen motorlarla birlikte, özel test altyapılarına sahip olmak ve onları geliştirmek de zorunlu bir ihtiyaçtır.

Her geçen gün ülkemizde bu alandaki çalışmalar artış göstermektedir. Gelişen savunma sanayii sektörü yanı sıra sivil alanda da birçok şirket bu sistemleri geliştirmektedir. TEI, TAI, 1'inci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı, TEC, Turkish Technic, KALE AR-GE, TR Motor Güç Sistemler San A.Ş. , bu sektöre hızla katkı sağlayan şirketlerin başında gelmektedirler. Her geçen gün hem motorların hem test sistemlerinin ihtiyaçlarının doğru olarak belirlenmesi hem de bu ihtiyaçlar doğrultusunda doğru çalışmalar yapılarak eksiklerin giderilmesi bu alanda sonuçları beraberinde getirecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde, havacılık, enerji üretimi ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan gaz türbinli motorlar, yüksek verimlilik ve performans sağlayan önemli enerji dönüşüm sistemleridir. Bu motorların tasarımı, geliştirilmesi ve test edilmesi, endüstriyel süreçlerin etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu literatür araştırma yazısı, gaz türbinli motorların ve bu motorların test edilmesi için kullanılan altyapı sistemlerinin mevcut durumunu, gelişmelerini ve gelecekteki potansiyel araştırma alanlarını incelemeyi amaçlamaktadır.

Çalışma, gaz türbinli motorların test edilmesi için kurulan yapılar ve altyapı sistemleriyle ilgili konuları ele almaktadır. Yapılan çalışma sırasında gaz türbinli motorlarla alakalı birçok kaynaktan yararlanılmış, özellikle de “The Jet Engine” (Rolls-Royce, 2005), kitabından ve şu an bu alanda hizmet vermekte olan kişilerin yaptığı çalışmalardan (Şal, 2021) yararlanılmıştır. Gaz türbinli motorlarla ilgili literatürde birçok kaynak bulmak mümkündür.

Gaz türbinli motorlar, termal enerji dönüşümünü temel alan karmaşık sistemlerdir. Bu motorlar, genellikle havanın sıkıştırılması, ısınması, yakıtla karıştırılması ve nihayetinde türbin üzerinde genişlemesi prensibiyle çalışır. Hava araçları, enerji santralleri ve endüstriyel tesislerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır.

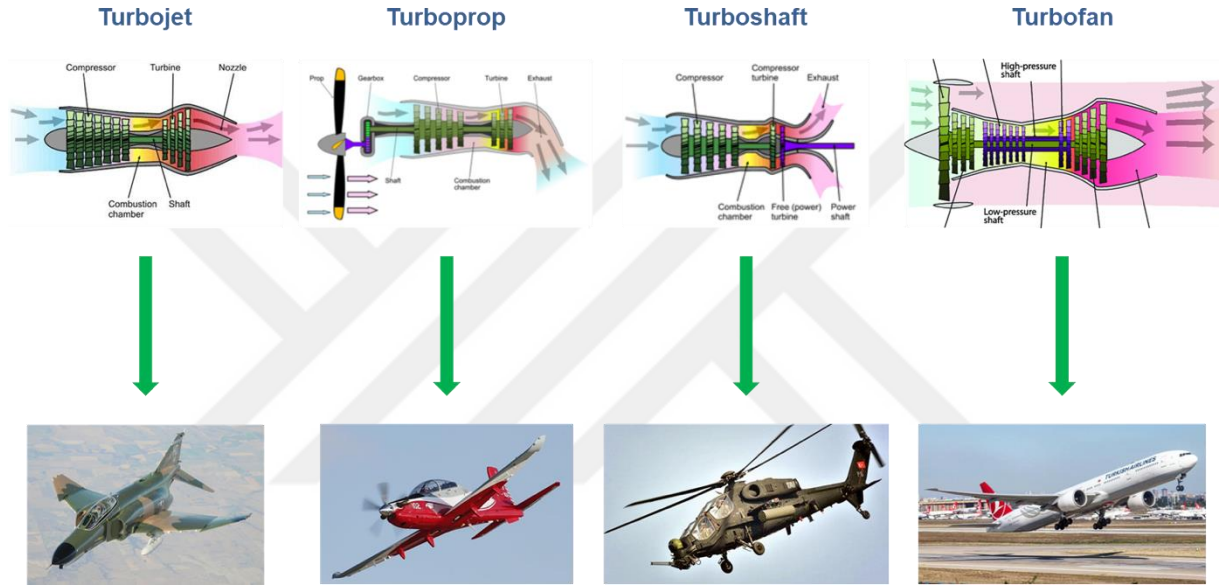
Gaz türbinli motorların performansını test etmek için ise uygun test altyapı sistemlerine sahip olmak, motor tasarımcıları ve üreticileri için kritik bir gerekliliktir. Bu test sistemleri, dinamometreler, veri toplama sistemleri, yakıt ve yağlama sistemleri, motor başlatma sistemleri ve haberleşme kontrol altyapı sistemlerini içerir. Dinamometreler, motordan üretilen torku ve gücü ölçerek performansı değerlendirirken, veri toplama sistemleri motorun çeşitli parametrelerini izleyerek analiz için veri sağlar. Yakıt ve yağlama sistemleri, motorun düzgün çalışması için yakıt ve yağ temin eder.

Literatürde, Gaz türbinli motorlar ve test altyapı sistemleriyle ilgili son yıllarda bu alanda gerçekleşen önemli gelişmeler ve yeni teknolojik yaklaşımlar üzerine bir dizi çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, motorların daha yüksek verimlilik, güvenilirlik ve dayanıklılık sağlamak için nasıl optimize edilebileceği konusunda değerli bilgiler sunmaktadır. Gaz türbinli motorların ve test altyapı sistemlerinin literatürdeki mevcut durumu, bu alandaki önemli gelişmeleri ve gelecekteki potansiyel araştırma alanlarını anlamak, motor endüstrisinin ilerlemesine katkı sağlayabilir. Gaz türbinli motorlar ve test altyapı sistemleri, enerji sektöründe ve endüstriyel uygulamalarda kilit bir role sahiptir. Bu literatür araştırma yazısı, mevcut bilgileri derleyerek, bu alandaki mevcut durumu değerlendirmeyi ve gelecekteki araştırma alanlarını belirlemeyi amaçlamaktadır.

Ülkemizde de bu alanda birçok firma hem askeri hem de sivil alanda hizmet vermekle birlikte sistemlerle ilgili kaynaklara ulaşamamıştır. Yapılan bu çalışmada birçok kaynaktan yararlanılmakla birlikte, özellikle (A.J. Martyr & M.A. Plint, 2007) kaynağından faydalanılmıştır. 2007’de yapılan bu çalışma spesifik herhangi bir gaz türbinli motor özelinde olmamakla birlikte genel test altyapı sistemleri ve kurulum süreçleriyle ilgili bilgiler içermektedir. Bu konudaki çalışmalar, daha önce 1’inci Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı bünyesinde yürütülen "Atılım Jet Motor Bremze Projesi" üzerinde çalışan bireylerin (Uçar & Karakiş, 2009) çabaları ile kıyaslanarak, bu çalışmanın ortaya çıkmasına yönlendirilmiştir. Edinilen deneyimler, yapılan gözlemler ve yürütülen çalışmalar sonucunda, literatürde bulunan çalışmalarla ortak sonuçlara varılmıştır; ancak, kurulum aşamasında izlenen yöntemlerde farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu farklılığın nedeni, test edilecek motor için uygun altyapı sistemlerinin kurulması ve kullanıcının talepleri doğrultusunda sınır koşullarının belirlenmesi gerekliliğidir ki bu çalışmada birçok kez vurgulanmıştır.

3. GAZ TÜRBLİNİ MOTORLAR

Havacılıkta kullanılan 4 ana çeşit motor vardır. Bu motorlar Şekil 3.1’de de görüldüğü üzere, turbojet, turboprop, turbofan ve turboşaft motorlardır. Bu motorlar güç üreten ve itki üreten motorlar olarak 2 ana kategoriye de ayrılır. Turbojet ve turbofan motorlar itki üreten, turboprop ve turboşaft motorlar ise güç üreten türbinli motorlardır.



Şekil 3.1. Gaz türbinli motorlar (Şal, 2021)

Çekirdek motor ya da gaz jeneratörü olarak adlandırılan kısım tüm türbinli motorların ortak yapısıdır. Yani başka bir deyişle tüm gaz türbinli motorlar çekirdek motor üzerine kuruludur.

Motor tipine göre, yapıda farklılıklar gözlemlenir. Turbofan motorlarında, giriş bölümünde fan ve düşük basınçlı kompresör bulunur; arka kısımda ise düşük basınçlı türbin yer alır. Düşük basınçlı türbin, fanı ve düşük basınçlı kompresörü döndürür. Turboşaft ve turboprop motorlarında, çekirdek motora ek olarak yüksek basınçlı türbinden sonra gelen güç türbini bulunur. Bu türbin, şaft gücü üreterek bir yükü döndürür. Güç türbini, enerjiyi tamamen gaz jeneratör türbinin çıkış gazından alır ve bunu çıkış şaftı aracılığıyla iletilmesi amaçlanan kısma aktarır. Genellikle, güç türbini gaz jeneratörüne veya çekirdek motora

mekanik olarak bağılı değildir. "Serbest güç türbini" olarak adlandırılan bu tasarım, güç türbininin hızını, enerji vereceği komponente bağılı olarak optimize etmeyi mümkün kılar, bu da ilave bir redüksiyon dişli kutusuna ihtiyaç duymadan gerçekleşir (Şal, 2021).

3.1. Turbojet Motorlar

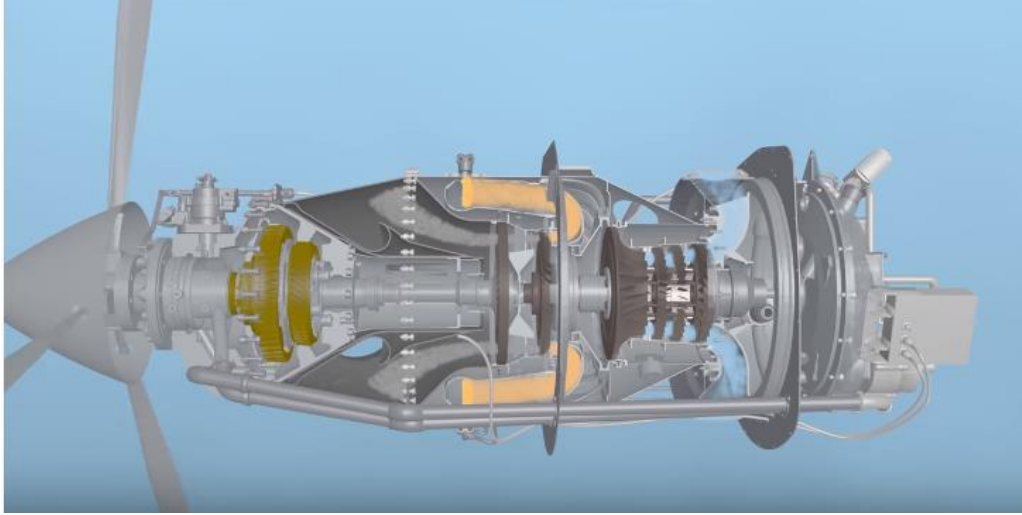
Turbojet motorları türbinde elde ettiği yüksek enerjili gazı geriye doğru çok kuvvetli bir şekilde iterek püskürtür. Yüksek gürültü seviyesinde çalışmasının yanı sıra, yüksek hızlarda verimli olduğundan dolayı genellikle askeri alanda kullanılır. Turbojet motora en güzel örnek ülkemizin KALE-ARGE firması tarafından üretilen KTJ-3200 ve TEI firması tarafından üretilen TJ-90 turbojet motorlarıdır. Şekil 3.2’de TEI tarafından üretilen ve geliştirilmekte olan TJ90 motorunun görseli görülmektedir. (Mehmet, 2019).



Şekil 3.2. TEI tarafından üretilen TJ90 (TEI, 2023)

3.2. Turboprop Motorlar

Turbojet motor dışındakilerin, turbojetin türevi olduğundan bahsedilmişti. Turboprop motorların tek farkı basit bir şekilde pervane ve dişli kutusu içermesidir. Yani türbinden elde ettiği enerjiyi dışarıya yüksek hızda atmak yerine, dişli kutusu ve mil yardımıyla pervaneye aktarır. Bu sayede gerekli güç oluşmuş olur. Şekil 3.3’te Hürkuş Temel Eğitim Uçağı’nda kullanılan PT6A-68T Turboprop motoru görülmektedir.



Şekil 3.3. HÜRKUŞ'ta kullanılan Pratt & Whitney Canada üretimi PT6A-68T turboprop motoru (Rolls-Royce, 2005)

3.3. Turbofan Motorlar

Çekirdek motor yapısı üzerine, ön kısma fan koyduğumuzda turbofan motorunu elde ettiğimizi söyleyebiliriz. Geniş fan sayesinde daha fazla hava kütlesi içeri alarak itkideki kütleli debiyi arttırmakta ve asıl performansını buradan sağlamaktadır. Genellikle yolcu uçaklarında kullanılır. Diğer motorlara göre daha yüksek verimliliğe sahip, daha düşük gürültü seviyelerinde daha düşük emisyonlar gibi avantajları bulunmaktadır. Aynı zamanda by-pass motorları olarak adlandırılan turbofan motorları, Şekil 3.4'te yerli üretici firma TEI tarafından çalışılan ve imalatı tamamlanan TF6000 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4. TEI tarafından çalışılan TF6000 (TEI, 2023)

Türkiye'nin Turbofan Motoru ihtiyaçlarını göz önünde bulundurarak kendi öz kaynakları ile projeyi hayata geçiren TEI, 6000 lbf kuru itki gücüne sahip ilk özgün tasarım milli TEI-TF6000 Turbofan Motorunu geliştirmektedir. Art yakıcı versiyonunu da destekleyecek şekilde tasarlanan motor, art yakıcı ile birlikte daha fazla itki sağlayacaktır. Bu motor programı, milli muharip uçağın motoruna yönelik teknoloji kazanımı ve gösterimini hedefleyen bir yapıya sahiptir (TEI, 2023).

Teknik Özellikler

- Kuru itki (SLS, ISA): 6.000 lbf
- Boyutlar (Genişlik x Yükseklik x Uzunluk): 860x1100x2250mm
- By-pass Ratio (SLS, ISA): 1,08
- Özgül Yakıt Tüketimi (lbf/lbs.h): 0,70
- Konfigürasyon
- Fan: 2 stage axial
- Kompresör: 6 stage axial
- Türbin: 1 stage HPT - 1 stage LPT
- Yanma Odası: Through Flow

3.4. Turboşaft Motorlar

Bu çalışmada genel olarak ele alacağımız motor olan turboşaft motorları turboprop motorları ile birbirlerini çok benzerler ve birçok turboşaft motorun turboprop modeli de mevcuttur. Örnek olarak Şekil 3.5'te görülen GE tasarımı T700 turboşaft ailesine ve CT7 turboprop motor ailesine örnek verilebilir. CT7 motoru; Bell 525, Sikorsky S-70, AgustaWestland AW189 olmak üzere çeşitli helikopterlere güç sağlar. Turboşaft ve turboprop arasındaki temel fark, turboprop versiyondaki pervanenin yüklerini destekleyecek şekilde motorun tasarlanması ve güç türbininin pervaneyi çevirecek bir dişli kutusu ile entegre edilmesi gerekliliğidir. TEI tarafından Gökbeş gibi platformlar için geliştirilen TS1400 turboşaft motoru; güç türbininde yapılacak değişiklikler, motora entegre edilecek dişli kutusu ve pervane ile turboprop motora çevrilerek Hürkuş'ta kullanılabilir. Teorik olarak bunun önünde bir engel bulunmamaktadır (Rolls-Royce, 2005; Şal, 2021).

Turboşaft motorlar, gaz türbinli motorların itki üretmekten ziyade, şaft gücü üretebilmesi amacıyla optimize edilmiş versiyonlarıdır. Konsept olarak bakılırsa turboşaft motorlar turbojet ve turbofan motorlara benzer özellik gösterirler. Ancak temel farkları gücün bir şaft vasıtası ile gereken araca uygulanmasıdır. Turboşaft motorlar genellikle yüksek güç çıkışı, yüksek güvenilirlik, göreceli olarak daha küçük ağırlık ve boyuttaki araçlarda kullanılması tercih edilir. Örnek olarak helikopterler, yardımcı güç ünitesi (APU), gemiler ve bazı tanklar verilebilir. Turboşaft motorlar genel olarak iki ana parçada incelenebilir. Bazı kaynaklara göre bu kısımlar “Sıcak Kısım” ve “Soğuk Kısım” olarak ayrılırken, bazı kaynaklar “Güç Bölümü” ve “Gaz Jeneratörü” olarak ayırır.

Gaz jeneratör bölümünde çoğunlukla kompresör, yanma odası, bujiler, yakıt uç çıkışları ve çoklu türbinler bulunur. Bunun yanında güç bölümünde ise adından da anlaşıldığı gibi gücün üretilmesi sağlanır. Bu yüzden bu kısımda çoğunlukla; güç türbinleri, şaft çıkışı ve devir düşürme dişlileri bulunur.



Şekil 3.5. T700 motoru (TEI, 2023)

Turboşaft motorlar, itki değil, güç üretmek üzere optimize edilmiştir. Yüksek güç/ağırlık oranları, hafif olmaları ve hacimsel olarak az yer kapladıklarından dolayı genellikle helikopter platformunda ve APU denilen yardımcı güç ünitelerinde kullanılır.

Turboşaft motoru 6 ana bölüme ayrılmaktadır. Bu bölümler:

- Aksesuarlar ve Fonksiyonel Gruplar
- Giriş Bölümü
- Kompresör
- Yanma Odası
- Gaz Jeneratör Türbin (Yüksek Basınç Türbini)
- Güç türbininden oluşur.

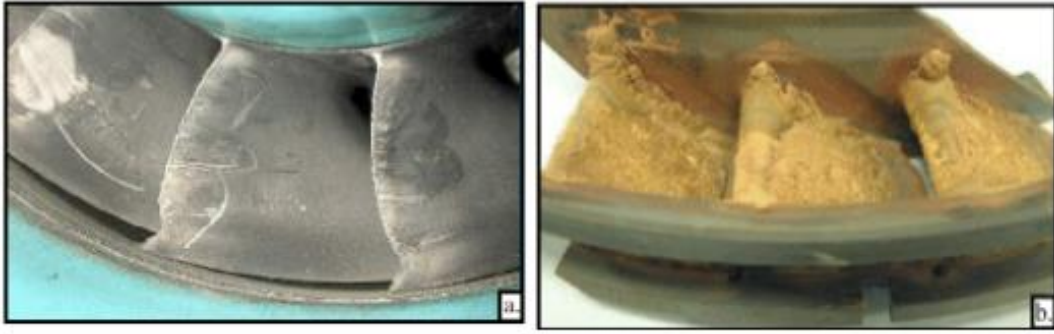
3.4.1. Aksesuarlar ve fonksiyonel gruplar

İlk olarak aksesuarlar ve fonksiyonel grupların detayından bahsetmek gerekmektedir. Bu kısım:

- Aksesuar dişli kutusu ve giriş partikül ayırıcı gibi aksesuarlar
- Yakıt pompası, filtreler, vb. yapılardan oluşan yakıt sistemi
- Ateşleyici, alternatör, vb. yapılar içeren elektriksel sistemler
- Pompalar, yağ soğutucu, filtre, sıcaklık ve basınç sensörü, vb. yapılar içeren yağlama sistemi
- Buzlanma önleme sistemi, başlatma valfi, müşteri tahliye havası, vb. yapılar içeren ikincil akış sisteminden oluşur (Şal, 2021).

Çalışmamızın ilerleyen kısımlarında bu aksesuar ve fonksiyonel grupları için ihtiyaç durumunda oluşturulan altyapı sistemlerinden detaylı şekilde bahsedilecektir.

Turboşaft motorlarında giriş kısmına gelen parçacıklar, kompresöre girmeden önce giriş partikül ayırıcı (IPS) ile ayrıştırılarak kompresöre temiz havanın gitmesi sağlanır. IPS komponentinin kullanılmasına rağmen bu partiküllerin kompresör kanatçıklarında oluşturduğu erozyon ve de türbin kanatçıklarındaki olası tıkanmalara neden olarak motorun performansını etkilemekte hatta stall oluşumuna kadar götürmektedir. Şekil 3.6'da çöl ortamında çalışmış kanatçık görselini görebilirsiniz.

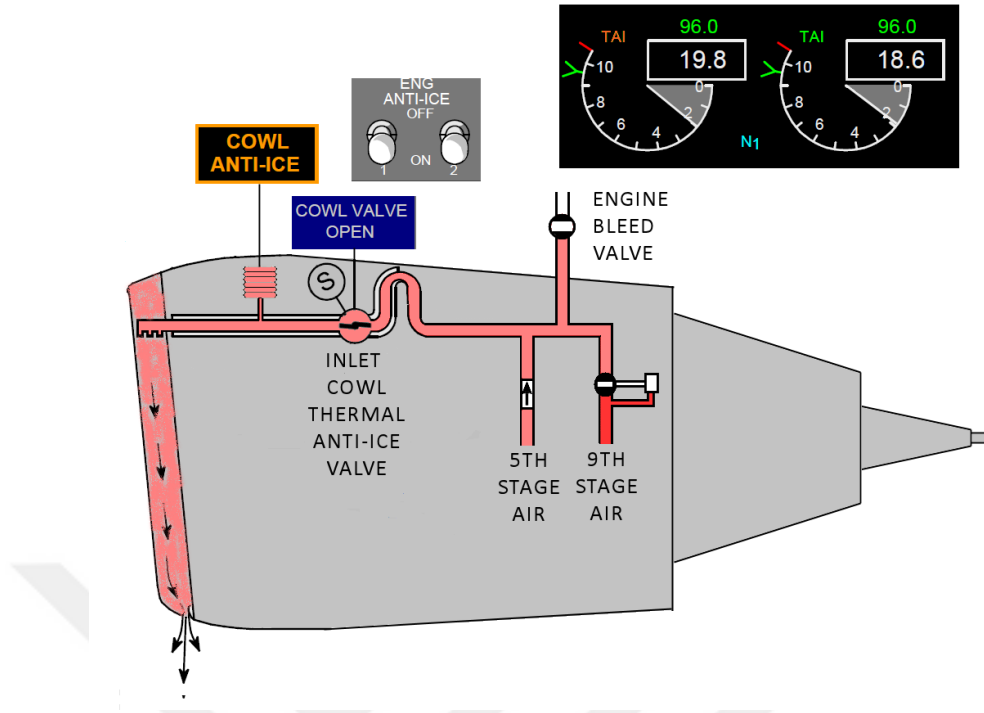


Şekil 3.6. Kompresör kanatçığı erezyon ile aşınma (a) ve Türbin kanatçığı tıkanma (b) (Filippone & Bojdo, 2014)

Gaz türbinli motorlar da bir diğer önemli durum ise Şekil 3.7'deki gibi motor yüzeylerinde oluşacak buzlanmayı, önleyen sistemdir. Hava sıcaklığı ve bağıl neme göre değişiklik görülebilen bu durum özellikle motorun sabit yüzeylerinde gerçekleştiği için motorun tasarımını da etkileyen önemli bir sistemdir. Yüksek irtifa (düşük basınç) ve de düşük güçlerde çalıştığı zaman havadaki su buharının yoğunlaşması ile buzlanma görülmektedir. Sistemin temel prensibi sabit yüzeylerde görülen buzlanmaya karşı kompresörden çekilen hava ile bu yüzeyler ısıtılarak buz oluşumunu önlemektir. Durmaksızın çalışan bir sistem olmadığı için Şekil 3.8'de görüldüğü üzere, bir buton yardımıyla pilotun gerekli gördüğü durumlarda kullanır. Buzlanmayı önlemek amacıyla kullanılan hava, kompresörden çekildiği için motorda anlık güç kayıpları gözlemlenmektedir.

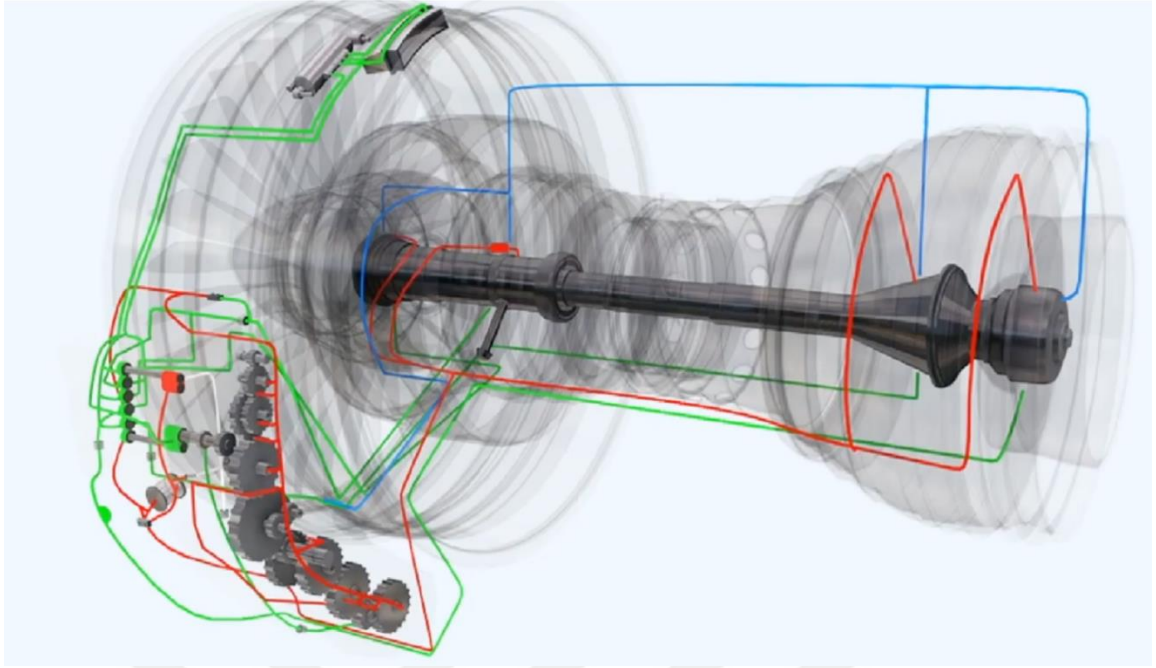


Şekil 3.7. Motor girişinde oluşan buzlanma örneği (Şal, 2021)



Şekil 3.8. Buz önleme sistemi (Şal, 2021)

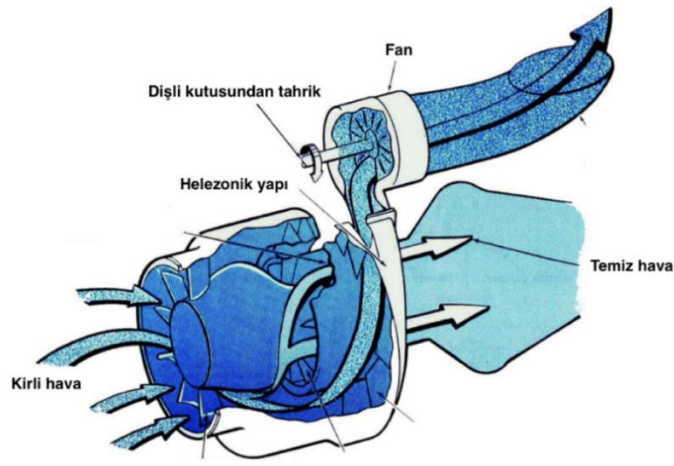
Aksesuar grubu arasında önemli diğer bir konu da yağlama sistemidir. Yağlama sistemi motor için kritik öneme sahiptir. Bremze altyapı sistemlerinde detaylarını anlatacağımız yağlama sistemi, motorun ana şaftının doğru yataklanmasını sağlayan rulmanların yağlanması ve soğutmada kullanılmaktadır. Motor yataklarına giden yağın dağılım yapısı Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Motor içerisinde yağ tankı, yağ pompası, ısı değiştirici (soğutucu) gibi ekipmanların arasında kapalı çevrim sistemle çalışmaktadır. Yağlama sisteminin en zorlandığı anlar manevra durumlarıdır. Yuvarlanma ve yunuslanma hareketlerinde yağlama sisteminin doğru çalışması kritiktir. Çok kısa yağ kesintileri dışında yağlama sisteminin çalışması beklenmektedir. Tüm bu doğrultuda yağlama sisteminin tasarımı da kolay olmamaktadır. Tüm bu kapalı çevrimde motora gönderdiğiniz yağı tekrar hatlardan, ana tanka emecek şekilde bir tasarım yapmanız gerekmektedir.



Şekil 3.9. Motor yağlama sistemi (Şal, 2021)

3.4.2. Giriş bölümü

Havanın motora girişinin olduğu ve hava alğından başlayarak kompresör girişine kadar olan kısımdır. İçeriye alınan havanın kompresöre en az kayıp ve düzgün bir akış formuyla kompresöre girmesi gerekmektedir. Yukarıda bahsettiğimiz Şekil 3.10'da gösterilen IPS (giriş partikül ayırıcı) ile giriş bölümü tasarımı birbirine uyumlu olması gerekir.

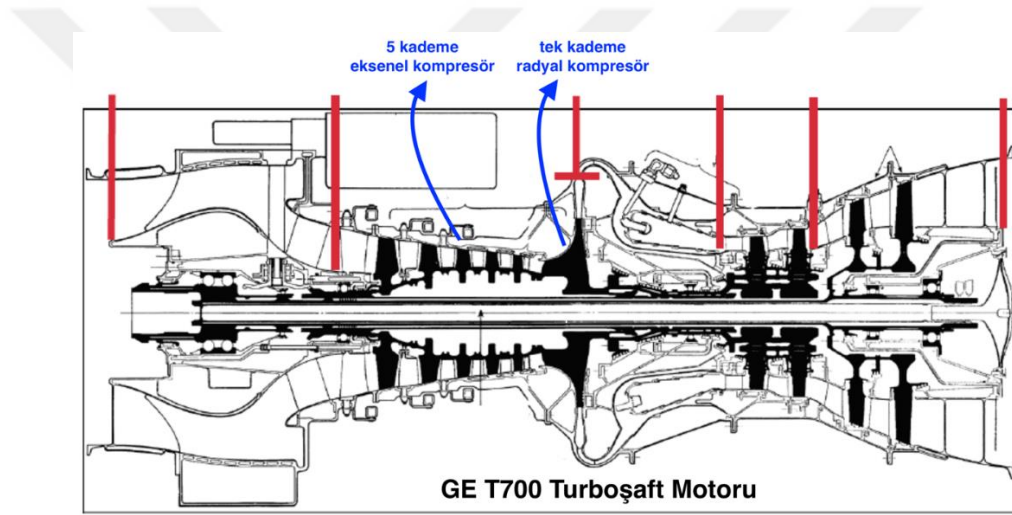


Şekil 3.10. Giriş partikül ayırıcı (Şal, 2021)

3.4.3. Kompresör

Yanma odasına girmeden önce havayı sıkıştırarak havanın basıncını ve sıcaklığını yükseltir. Kompresör performansı, motorun performansı ile doğrudan ilişkilidir.

Gaz türbinli motorlarda kullanılan iki ana tip kompresör vardır. Bunlar eksenel kompresör ve radyal kompresördür. Turboşaft motorlarda çoğunlukla radyal kompresör ya da eksenel+radyal kompresör kombinasyonları kullanılır. TEI TS1400 motoru 2 kademe radyal kompresörden oluşurken, GE T700 motoru ise Şekil 3.11’deki gibi 5 kademe eksenel ve 1 kademe radyal kompresörden oluşmaktadır.

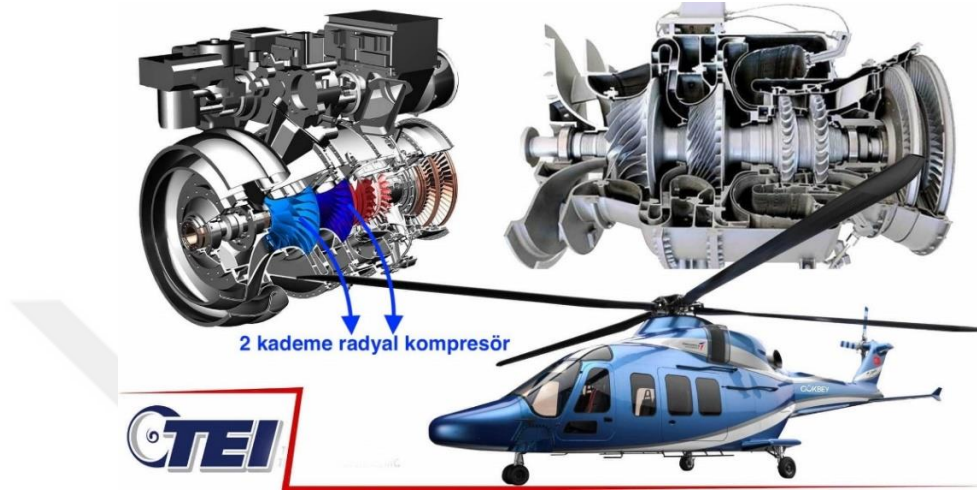


Şekil 3.11. GE T700 motoru eksenel ve radyal kompresör tasarımı (Şal, 2021)

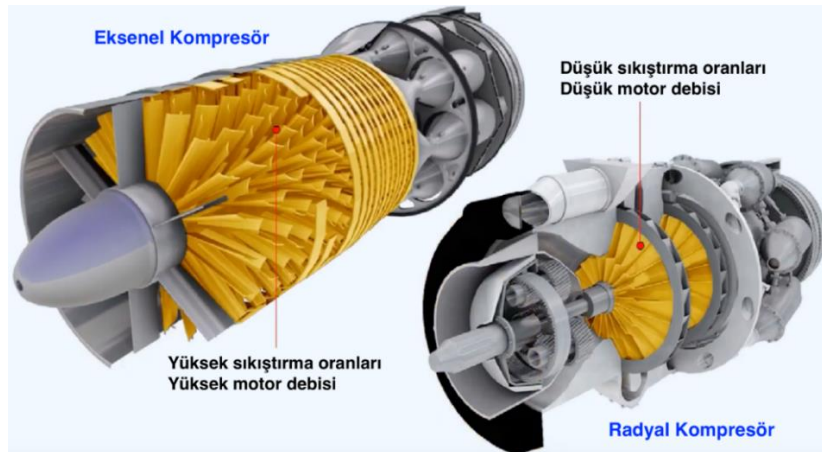
Radyal kompresörlerde impeller olarak adlandırılan hareketli kısım, akışı radyal yönde dışarı doğru fırlatarak hızlandırır. Bu esnada akışkan basıncı da artar. Akış sonrasında difüzör olarak adlandırılan hareketsiz yapılarda yavaşlatılarak basıncın daha da artması sağlanır (Şal, 2021).

Radyal kompresör ve eksenel kompresörlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Radyal kompresörlerin tasarımı ve imalatı eksenel kompresörlere kıyasla daha kolayken, eksenel kompresörlerin tasarımı daha zordur. Radyal kompresörler tek kademe daha verimli bir yanma için sıkıştırma sağlayabilirler. Eksenel kompresörlerin motor debisi ve kompresör çıkış oranı radyal kompresörlere göre daha yüksektir. Bunun sonucunda itki ve yakıt ekonomisi olarak dezavantajlı durumdadır. Radyal

kompresörler performans anlamında dezavantajlı durumda olsalar da montaj ve imalatı daha kolay olduğundan ve daha güçlü olmalarından dolayı turboprop ve turboşaft motorlarda daha çok tercih edilirler. Şekil 3.12’de Gökbey platformuna takılacak olan TS1400 motorunun 2 kademe radyal kompresörden oluştuğu görülür.

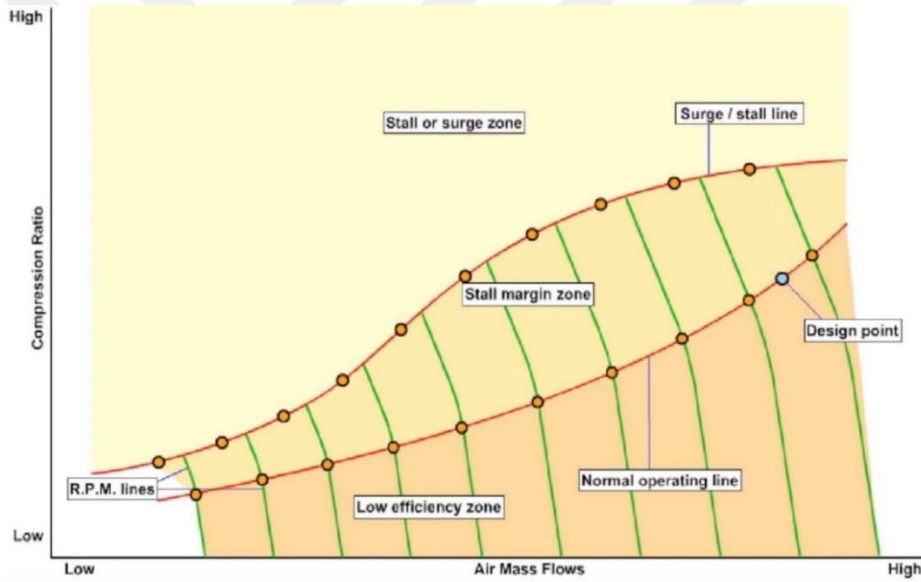


Turbofan motorlarda çoğunlukla eksenel kompresör görmemizin sebebi yakıt ve itki tüketimi anlamında daha verimli olmasıdır. Şekil 3.13’te yüksek sıkıştırma oranı ve yüksek motor debisine sahip eksenel kompresör ile düşük sıkıştırma oranı ve düşük motor debisine sahip radyal kompresör açıkça görülmektedir. Eksenel kompresör motorun boyunun eksenel yönde uzamasına sebep olmuş iken, radyal kompresör ise daha kısa fakat radyal yönde daha büyük olmasına sebep olabilir.



Şekil 3.13. Eksenel ve radyal kompresör (Şal, 2021)

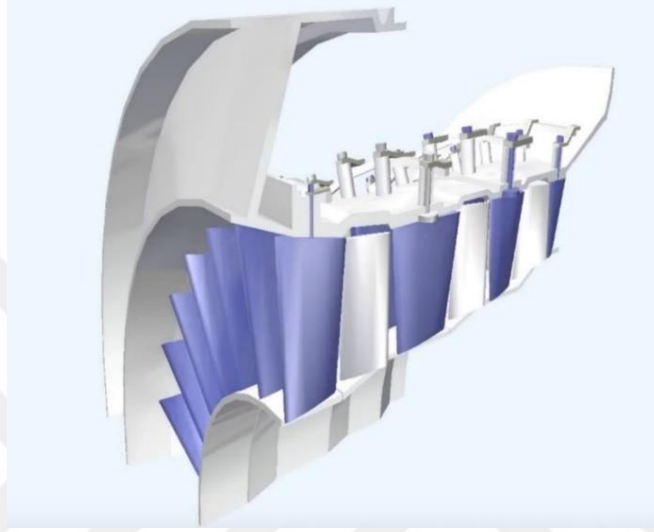
Kompresör tasarımı çok kolay değildir. Kompresör tasarlanırken bir noktaya göre tasarlanır ancak tasarım dışındaki tüm noktalar kompresörün sağlıklı çalıştığından emin olmak için kontrol edilmelidir. Bu çalışma sonucunda kompresör çalışma eğrisi ortaya çıkmaktadır. Çalışma eğrisinin surge çizgisi olarak bölgeden yeterince uzakta çalışması gerekir. Bu olaya surge margin denir. Kompresörün stabil çalışması ve tehlikeye girmemesi için surge margin çizgisinin dışında çalışmalıdır. Yeteri kadar uzak bölgede çalışılmazsa, motorun stabil çalışması pek mümkün değildir. Şekil 3.14'te bu bölgeler açıkça görülmektedir. Olası giriş bozuntusunda veya ani hızlanma/yavaşlama durumlarında stall ya da surge ile karşılaşılabilir. Eksenel kompresörler çok kademelidir, radyal kompresörler ise 1 ya da 2 kademelidir. Kompresörlerde bu kademelerin birbiri ile eşleşmesi de çok önemlidir. Kompresör bir bütün olarak stabil çalışmalıdır.



Şekil 3.14. Kompresör çalışma eğrisi-surge marjini (Şal, 2021)

Başka bir problem ise motorun başlatılması esnasında gözlemlenir. Normal çalışma noktasında, yüksek sıkıştırma oranlı kompresörlerde, ilk kademeden son kademeye doğru sıkıştırılan havanın yoğunluğu artarken ana akış yolunun kesiti azalır ki kompresör önden arkaya doğru dengeli yüklensin. Kademeler boyunca eksenel hız değişmez. Fakat başlatma anında hava debileri düşüktür ve düşük shaft hızlarından dolayı da arka kademelere doğru yoğunluk artışı pek olmaz. Bu durumda ön kademeler aşırı yüklü iken arka kademelerde eksenel hız da yüksek olduğundan daha az yüklüdürler. Başlatma sürecinde, kompresörün

ön ve arka kısımlarında yükleme farklılıkları ve eksenel hız farklılıklarının çözülmesi gerekir. Aksi halde kompresör stall olabilir. Bu problemin farklı çözümleri olsa da kompresörün orta bölgelerinden dışarıya hava atılması ve sabit kanatçıkların açılarının Şekil 3.15'te görülen, VSV olarak adlandırılan yapılar ile ayarlanması en yaygın olanlardır (Boyce, 2012; Şal, 2021).

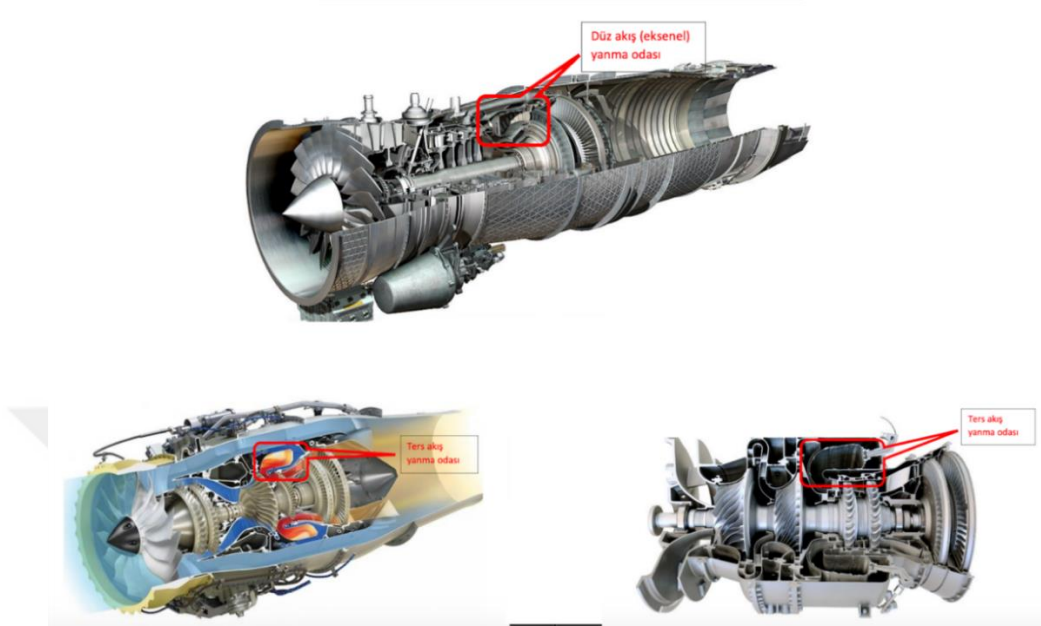


Şekil 3.15. VSV mekanizması (Şal, 2021)

3.4.4. Yanma odası

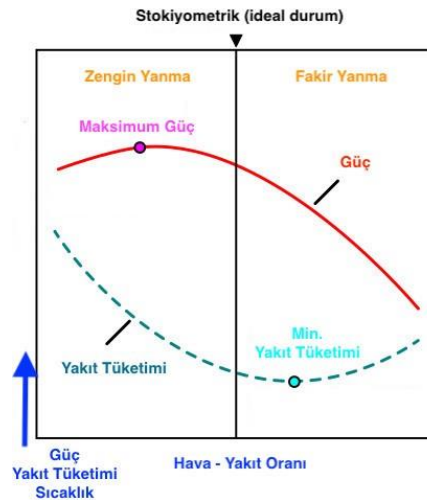
Kompresörden sıcaklığı artarak çıkan yüksek basınçlı havanın bir kısmı yanma odasına girer. Yanma odasına giren hava ile yakıt karıştırılarak ateşleme gerçekleşir ve yanma olayının gerçekleşmesi sağlanır. Yanma odasına girmeyip yanma odası gömleğinin deliklerinden yanma sonrası akış ile karışıp gaz jeneratör türbinine ulaşır. Bu hava soğutma havası olarak da tanımlanır. Farklı tipte ve kategoride yanma odası tipleri bulunmaktadır. Kategori olarak sınıflandırdığımız da ters akış ve eksenel yanma odası olmak üzere 2 gruba ayırabiliriz. Eksenel yanma odası biraz daha geleneksel ve eskiden kullanılmaya başlaması sebebiyle daha yaygındır ancak son geliştirilen motorlarda ters akışlı yanma odası da sıkça görülmektedir. Birbirlerine göre avantajlar ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, ters akış yanması odası hem ana şaftın uzunluğunun kısalmasını sağlarken hem de yakıt enjektörlerinin bakım erişim kolaylığı sağlamaktadır. Boy avantajından dolayı genellikle turboşaft ve turboprop motorlarda daha sık rastlanırken az da olsa bazı turbofan motorlarda

da ters akış yanma odasıyla karşılaşmak mümkündür. Şekil 3.16’da farklı motor konfigürasyonlarında ki yanma odası çeşitleri görülmektedir.



Şekil 3.16. Yanma odası konfigürasyonları (Şal, 2021)

Yanma odası maksimum ısıda, minimum basınç kaybı ile olabileceği en yüksek seviyede yanma verimi gerçekleştirmeyi hedefler. Yanma odası tasarımı da en az diğer komponentler kadar zordur. Yanmanın başlatılması ve devam ettirilmesi en doğru en optimum şekilde hava/yakıt oranı ile gerçekleşebilir. En ideal hava yakıt oranını belirten durum stokiyometrik oran olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.17’de stokiyometrik oranın grafiğini görebilirsiniz.



Şekil 3.17. Stokiyometrik oran (Şal, 2021)

Yanma için bu oranın tek başına sağlanması yeterli olmayacaktır. Yakıtın doğru açıda, doğru tanecik boyutu ile yanma odasına giriş yapması ve igniter (ateşleyici) ile ateşlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, yanma odası çıkış sıcaklık profilinin türbin girişinde hedeflenen değere getirilmesi de önemlidir. Bu profildeki her sapma daha fazla soğutma ihtiyacı doğurur ya da türbinin ömründe azalmaya sebep olur (Şal, 2021).

3.4.5. Gaz jeneratör türbin / Yüksek basınç türbini

Yanma odası arkasında bulunan gaz jeneratör türbini, kompresör hareketini sağlamak için gerekli torkun oluşmasını sağlar. Yanma odasından çıkan yüksek enerjili ve basınçlı havayı sabit kanatçıklar hıza dönüştürürken, hareketli kanatçıklar da bu hızı dönme hareketine çevirir. Aynı kompresörde olduğu gibi burada da hem eksenel hem de radyal türbin tipi bulunmaktadır.

Türbinler, kompresörlerin aksine sıkıştırmayıp, genişleme yaptıklarından akış ayrılması olmaksızın çok daha yüksek akış açıları mümkündür ve bu nedenle eksenel türbinler eksenel kompresörlerden çok daha az kademeye sahiptirler. Turbojet motorlardan bir örnek vermek gerekirse, KALE KTJ 3200 motorunda 4 kademe eksenel kompresör bulunurken, türbin bölümü tek kademe ekseneldir.

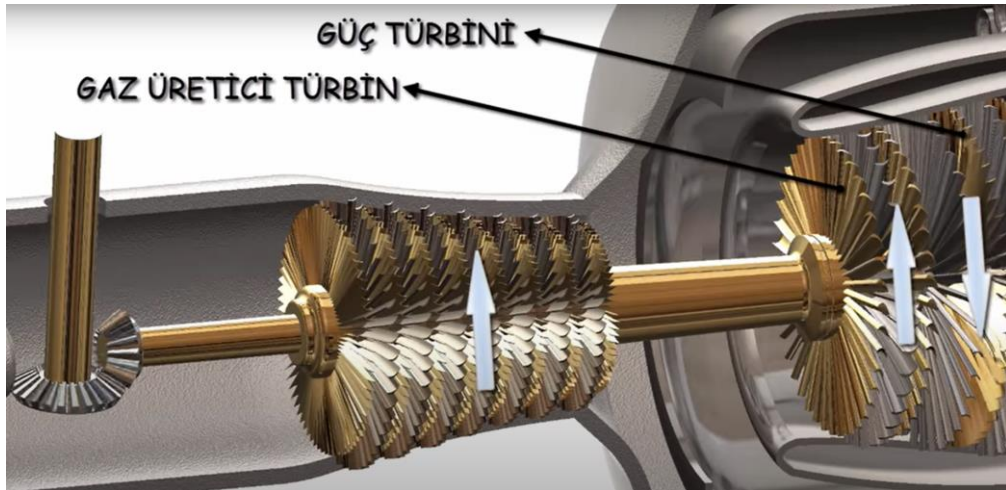
Türbin kanatçıkları üzerindeki gerilme kompresörlere oranla çok daha yüksektir. Türbin kanatçıkları kompresör kanatçıklarından farklı olarak yüksek sıcaklığa maruz kalarak yüksek hızlarda dönerler. Örnek verecek olursak Boeing 737 veya Airbus A320 gibi uçaklarda tercih edilen CFM56 motorlarında tek kademeli eksenel türbin bulunur. Bu türbin kanatçıklarının her birine maksimum devirde, 10 tondan fazla bir merkezkaç kuvvetine maruz kalmaktadır. Diske etkiyen toplam merkezkaç kuvveti bu sayının 8 katından fazladır. Bu kanatçıkların bu kuvvetler altında ve yüksek sıcaklıkta çalıştığını düşünürsek oluşabilecek riskleri hayal edebiliriz. Bu sebeple türbin soğutma teknolojisi ve türbin tasarımının oldukça önemli olduğunu söyleyebiliriz (Poullikkas, 2005; Şal, 2021).

3.4.6. Güç türbini

Güç türbini, gaz jeneratör türbininden aldığı enerjiyi çıkış şaftı vasıtasıyla sürmesi gereken araca iletir. Güç türbini, bir redüksiyon dişli kutusuna veya doğrudan bir çıkış şaftına bağlıdır. Bu sayede üretilen güç helikopterlerde transmisyon sistemine aktarılır. Transmisyon sistemi ise, gücü motordan ana rotora, kuyruk rotoruna ve diğer aksesuarlara aktarır. Transmisyon sisteminin ana bileşenleri, ana rotor şanzımanı, kuyruk rotor tahrik sistemi, debriyaj ve serbest dönme ünitesidir. Serbest devinim ünitesi, ana rotor transmisyonunun otorotasyon sırasında kuyruk rotor tahrik şaftını çalıştırmasına izin verir. Ana rotor transmisyonunun birincil amacı, motor çıkış devrini optimum rotor devrine düşürmektir. Bu oran, çeşitli helikopterler için farklıdır. Bununla ilgili bir örnek vermek gerekirse; Sikorsky S-70 helikopterinde GE T700 turboşaft motoru kullanılmaktadır. T700 güç türbini çıkış şaft dönme hızı 20.000 RPM iken ana pervane yaklaşık olarak 260 RPM ile döner. Ana dişli kutusunun sağladığı oran 77,5:1'dir.

Güç türbinlerinin bulundukları ortam, yanma odasından dolayısıyla yanma olayında biraz daha uzakta olduğundan gaz jeneratör türbinlere kıyasla daha az zorlayıcıdır.

Motorun bütünü ile ilgili titreşim ve rotor dinamiği konusunda da dikkat edilmesi gereken detaylar bulunmaktadır. Öncelikle motorun çalışma hız aralığında herhangi bir çakışma bulunmamalıdır. Motordaki tüm bölümler bir bütün halinde uyum içinde çalışmalıdır (Şal, 2021). Şekil 3.18'de güç türbini ve gaz jeneratör türbin görülmektedir.



Şekil 3.18. Güç türbini ve gaz üretici türbin (Yavuz, 2018)

4. YÖNTEM

Bu araştırma gaz türbinli motorların test edildiği genel ve ortak olan altyapı sistemleri ile test odaları incelenerek yapıldı. Ülkemizde havacılık çalışmaları hayli artmışken, hava araçlarına olan ilgiyle birlikte bu araçların bakım, onarım ve revizyonunun yanı sıra test altyapı sistemlerinin gelişmesi de hız kazanmıştır. Test altyapı sistemleri ve kurulumu ile geçmişte yeterince bilgi birikimi oluşmamış, son yıllarda yapılan çalışmalarla bu bilgi birikimi oluşmaya başlamıştır. Bu çalışma ile de buna katkı sağlanması amaçlandı.

Uluslararası şirketlere bakacak olursak GE Aviation, Safran ve Anecom gibi firmalar uzun süreli deneyime sahip ve çalışmalarına devam eden firmalardan bazılarıdır.

GE Havacılık yüzyılı aşkın süredir ticari ve askeri uygulamalar için dünyadaki birçok havacılık motorunu tasarlar ve üretir. Bu motorları güvenli ve uygun maliyetli şekilde pazara sunmakla birlikte, geliştirme sürecinin her aşamasında yer almaktadır. Test tesisleri tasarlayanın yanı sıra testlerin tasarlanması ve gerçekleştirilmesi için de özel mühendislik hizmeti sunacak konuma gelmiştir. GE Havacılık, test tesislerine önemli bir yatırım yaptı ve diğer firmalara da hizmet vermeye devam etmektedir. İrtifa testleri, yanma odası testleri, buzlanma testleri, türbin testler, aero ve yanma testi, termal yönetim testleri, titreşim testi ve uçuş testlerinin dışında birçok spesifik test altyapı sistemini GE Havacılık bünyesinde bulabilirsiniz (GE Aerospace, 2024).

Özellikle askeri havacılık alanında 30 yılı aşkın süredir hizmet veren Safran test merkezleri, 20'den fazla ülkenin hava kuvvetlerine de test merkezi kurmuştur. Tüm gaz türbinli motorlar için test altyapı sistemi kurmuş olan Safran şirketi kendi işlettiği 4 test odası (bremze) dışında, 20 çeşitten fazla helikopter yani turboşaft motorları için test odası tasarlamıştır. Günümüzde bu konuda birçok patente sahiptir (Safran Group, 2024).

2002 yılında kendi şirket içinde kompresör testleri ve enstrümantasyon tasarımı ile çalışmalarına başlayan Anecom şirketi ise bugün birçok test altyapı sistemiyle çalışmalarına devam etmekte ve hizmet vermektedir (Anecom, 2024).

Bu çalışma da yukarıda belirtilen firmaların yaptığı çalışmalar gibi havacılık test sistemlerinden esinlenerek, ülkemiz için bilgi birikimine katkı sağlamak ve ülkemizde de bu tip çalışmaların yapıldığını göstermek amacıyla yapıldı. Geçtiğimiz yıllarda bu tür hizmetleri dışarıdan alan özellikle savunma sanayindeki yerli firmalarımız artık kendi test altyapı sistemlerini kurmakta ve testleri kendi bünyesinde yapabilmektedir. Bu sayede hem kendi öz kaynaklarımız içeride tutabilmekte hem de sistemlerimizi geliştirerek dışarıya da hizmet verecek konuma gelmektedir. Çalışmamızda bu sistemlerin ülkemizde de örneği olan gaz türbinli motorların motor bütünü testlerine hizmet edecek bremze kurulum süreci, hem uluslararası kaynaklardan hem de yerli kaynaklardan faydalanılarak anlatılmaktadır.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Bina Alt Sistem ve Bremze (Test Odası) Kurulum Süreçleri

Motorların test edileceği test odaları ve odaların bulunacağı bina kurulum planlaması oldukça önemlidir. Yeterli altyapı kaynakları, oda boyutları, duvar beton özellikleri gibi birçok etkenin başlangıçta belirlenmiş olması gerekmektedir. Bu kısımda binaların henüz temel aşamasından, bremzede bulunacak olan destek altyapı süreçlerine kadar her konudan bahsetmeye çalışıldı. Bu kısım test tesisi proje ve sistem entegrasyon altyapısı ve daha sonra spesifik olarak bremzeyi oluşturan altyapı sistemleri olmak üzere iki ana alt başlık içerisinde incelenecektir.

5.1.1. Test tesisi proje ve sistem entegrasyon altyapısı

Motor test tesisi, içerisinde makineleri, destek sistemlerini ve enstrümanları içeren büyük bir sistem olarak düşünülebilir. Bu yapıların birbirleriyle senkronize olarak çalışması son derece önemlidir. Genellikle bu yapılar için özel bir alan, bina veya oda tasarlanarak işe başlanabilir. Sonrasında ise test odası detayları oluşturularak devam edilebilir. Bina altyapı uygunluğu oda içerisindeki sistemlerin çalışmasını doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple bu tasarım içerisindeki uyumluluk, altyapı destek sistemleri ve yeterlilik oldukça önemlidir.

5.1.1.1. Test tesisi özellikleri

Test tesisi tasarımı yapılırken projenin detaylarının yolun başında açık ve net olması sebebiyle isterleri ve kabiliyetleri açıkça tanımlayan şartname/sözleşme ile ilerlenmesi gerekmektedir. Bu şartnameler:

- Operasyonel Şartname, tasarlanacak ve inşa edilecek olan tesisin “ne için olduğunu” açıklayan şartnamedir. Kullanıcı tarafından hazırlanmaktadır.

- İşlevsel Şartname, gerekli becerilere sahip kullanıcılar tarafından yapılan fizibilite çalışması doğrultusunda sistemin “nelerden oluştuğu ve nereye gideceğini” belirttiği şartnamedir.
- Ayrıntılı İşlevsel Şartname, tedarik sözleşmesi kapsamında altyapı sistemindeki tüm ekipmanların nasıl çalıştığını açıklayan şartnamedir.

Bu hem sistemin tümü içerisinde çalışacak olan farklı alt yüklenici firmalara işin tanımlanması hem de ana yüklenicinin sistem ve kurguya hâkim olmasını sağlayacaktır. Diğer bir katkısı da projenin başında bütçelendirilmesi ve maliyet bilinci kazanılmasını sağlar.

Operasyonel şartname, tesisin hangi görev için oluşturulduğuna dair net bir açıklama içermelidir. Bu kısımda tesisin ana görevini açıklamaya gerek olmadığı gibi, gerekli altyapı ekipmanlarının detaylarını vermesi de gerekmez. Son kullanıcı tarafından oluşturulması gereken bu belgenin ana amacı taslak planı oluşturmak ve bütçe desteği sağlamaktır. Bu şartnamede öngörülen tesis kabul testlerinin kısa bir tanımı yapılması beklenen sonuçları tanımlamak için uygun olacaktır.

Bu şartname aşamasında ön fizibilite çalışmaları yapılmaktadır. Bu aşamada proje maliyet hesaplaması yanı sıra kurulacak tesisin yerinin planlanması yapılabilir. Tesisin çevresine yaratacak etkilerini belirlemek amacıyla da çevresel etki raporu hazırlanabilir. Bu tür çalışmalar prova tasarım sözleşmesi olarak da adlandırılabilir.

Burada yapılan fizibilite çalışması belirli bir saha planı ile ilgili olacaktır. Yapılan çalışmalar bütçe ve taslak planlama izninin alınmasında destekleyici nitelik taşımalıdır. Bu sebeple içeriğinde saha yerleşim çizimi ve nihai bina işlerinin grafiksel gösterimi bulunmalıdır. Yine bu aşamada test tesislerinin kurulacağı alana uygunluk verilip verilmeyeceği konusu açısından; yerel planlama yetkililerinden görüş alınması faydalı olacaktır. Test tesisinin kurulacağı alanda jet yakıtı kullanılacağı, süreç içerisinde belirli zamanlarda gürültü kirliliği oluşturabileceği veya yüksek voltajda elektrik enerjisi gerekebileceği ve buna benzer gereksinimlerin de olabileceği göz ardı edilmemelidir.

İşlevsel şartname, operasyonel şartnameyi temel alarak tesisin ne yapması gerektiğini, nasıl yerine getireceği ve neleri içereceğini açıklar. İşlevsel şartname de gereksiz ve aşırı kuralcılıktan kaçınılmalı, ayrıca teknik açıdan yetersiz bölümler içermemelidir. Çünkü bu tip şartnameler yükleniciler tarafından sorun yaratabilmektedir. İşin tam olarak belirtilmemiş veya anlaşılmamış olması uygunluk iddiası belirten bir şirketin sözleşmeyi kazanması hemen akabinde müşterinin beklentilerini karşılayamayarak sistemin başarısız kurulmuş olmasına, bunun da ilerleyen süreçlerde proje takvimi ve maliyetine ciddi zararlar verilebileceği unutulmamalıdır.

İş bu aşamada en küçük test tesisi (bremze) projesi hariç, müşterinin muhatap olması ve genelde birlikte koordineli çalışması gereken üç genel yüklenici olacaktır.

- İnşaat müteahhidi,
- Şirket içerisinde bina hizmetleri ve bakım ekipleri,
- Test enstrümantasyon yüklenicisi olan ilgili ekip.

Bu ekiplerin birbiri ile koordineli çalışmasının en büyük avantajı hem test sistemini kullanacak olan ekiplerin sistem kurulum aşamasında sisteme doğru girdi yapabilmesi hem de kullanacağı sisteme hâkim olması anlamına gelmektedir. Kullanıcının alt yüklenicilerle olan bu çalışmasının başarısı, kurum içi becerilerinin mevcudiyetine, tecrübelerine bağlı iken öte yandan tercih edilen yüklenicilerin beceri ve deneyimleri de oldukça etkili olacaktır.

Ayrıntılı işlevsel şartname, bu şartnameyi işlevsel şartnameden ayıran en önemli özellik altyapıda bulunan tüm alt sistemlerin detaylarıyla nasıl çalışacağını belirtecek olmasıdır. İşlevsel şartname sistemleri biraz daha genel hatlarıyla çizerken, ayrıntılı işlevsel şartname o sistemlerin üzerinde bulunacak enstrümantasyon ve kabiliyetleri net şekilde ortaya koymalıdır. Örnek vermek gerekirse, işlevsel şartnamede altyapı sisteminde yağlama altyapısını olacağını belirtirken, ayrıntılı işlevsel şartnamede yağlama altyapısının debi kapasitesi, üzerinden alınması gereken basınç, sıcaklık gibi enstrümantasyonların olması ve nerede bulunması gerektiği, hangi sıcaklık aralığında çalışacağı gibi detaylar belirtilmelidir.

Bu kısım kullanıcı tarafından oldukça önem arz etmektedir. Günün sonunda kullanıcı test edilecek olan motorun isterleri doğrultusunda bir sistem kurmaya çalıştığından dolayı, motor testinde motorun ihtiyaçlarını karşılayamayacak olan bir altyapı hem maliyet hem proje takvimini ve belki de farkında olmayarak motoru riske atma ihtimali taşımaktadır.

Tüm karmaşık endüstriyel projelerde olduğu gibi, bir motor test laboratuvarının kurulması veya önemli ölçüde değiştirilmesi, kullanıcı olan tüm departmanların ve bireylerin dahil olduğu bir operasyonel şartnamenin oluşturulmasıyla başlamalıdır. Motor test görevlerinin belirlenmesi ve uygun kabul testlerinin tanımlanması böyle bir projenin temel ön koşullarıdır.

Proje yöneticisi, tasarım yetkilisi ve sistem entegratörü rolleri iyi tanımlanmalı ve yetkilendirilmelidir. Özellikle, sistem entegrasyonu için tasarım yetkilisinin teknik isterleri sözleşmeye uygun bir şekilde ve açıkça belirttiğinden emin olunması gerekmektedir.

Dikkate alınması gereken üç aşama vardır. Başarılı bir proje sonucuna varılmak isteniyorsa bunların doğru bir şekilde hazırlanması önemlidir. Burada her projede olduğu gibi atlanan, unutilan, gözden kaçan noktalar elbette olacaktır fakat bu eksikleri projenin başında ne kadar minimize edebilirsiniz projenin başarısı o denli artacaktır.

Üst kısımda detaylı şekilde de anlatıldığı gibi, projenin başında şartname gerektiği kadar açık ve net olmadığı sürece projenin yürütülmesine izin verilmemelidir. Çünkü hepimizin zaman zaman karşılaştığı gibi sektör içerisinde veya dışında birçok şirket görevi hafife alarak projeyi uygunsuz şekilde tamamlayıp, daha sonradan proje üzerinde daha fazla maliyetlere revize ederek tamamlamaktadır. Bunun sonucu olarak proje süreleri yinelemeli bir teklif süreci geçirmekte hatta ek maliyetlere sebep olmakta ve kullanıcıların beklentileri de genellikle ilk devreye alma aşamasında karşılanmamaktadır (A.J. Martyr ve M.A. Plint, 2007).

5.1.2. Bremze altyapı sistemleri

Motor testlerinin ana amaçlarından biri tasarım ve performans ekiplerinin çalışma bulgularına girdi yapabilmesidir. Tasarlanan bir motor parçasının veya analizi yapılan bir parçanın test anında motor üzerindeki gösterdiği uyumluluğu ve davranışı ekiplere geri bildirim olması açısından kritik önem taşır. Bu sebeple test tesisi içerisinde motora yardımcı olan tüm ekipmanların sisteme dahil edilmesi, gerekli tüm ölçümlerin sağlıklı şekilde alınabilmesi ve tüm enstrümantasyonların tesis altyapısına entegre edilmesi gerekmektedir. Bu ölçümler ile hem tasarım hem de performans ekiplerine girdi sağlanabilirken, öte yandan motorun sağlıklı çalışıp çalışmadığını takip etmemizde test operatörüne yardımcı olur ve testin icra kontrolünü de yine operatöre verir.

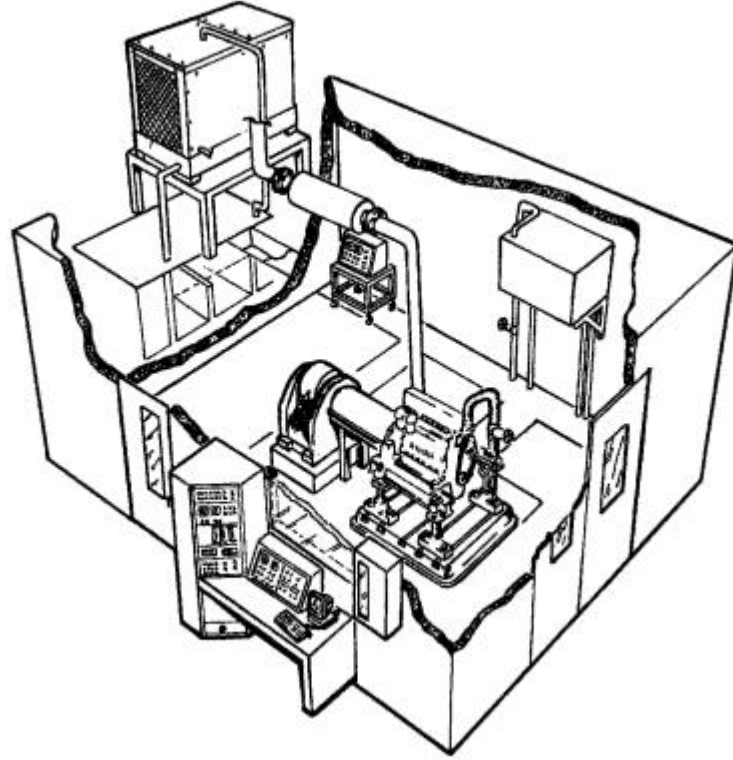
Öncelikle sık sık kullanılacak olan “Bremze” kelimesinin açıklanmasında fayda var. Bremze, havalimanlarında ya da uçak motoru atölyelerinde uçak motorunun çalıştırılarak motorun yağının, yakıtının, hidrolik gibi kaçak kontrollerinin ve performans değerlerinin uçak üzerinde uçuştaymış gibi kontrol edildiği alanlara denir (Tüz, 2021). Ülkemizde de bu bakış açısından esinlenerek mevcut sertifikasyonlu veya üzerinde çalışılmaya devam edilen AR-GE motorlarının da testlerinin yapıldığı alan bremze olarak adlandırılır. Kısacası bremze, hava alanlarında ya da uçak motoru test atölyelerinde motorun çalıştırılarak test edildiği alanlara denir. Şekil 5.1’de TEI firmasının kurmuş olduğu bir turboşaft bremzesinin görseli bulunmaktadır.



Şekil 5.1. TEI örnek bremze (Defense Here, 2022)

Bremzelerin kurulacağı binaların altyapısı aşağıda sıralanmış olan özelliklere elverişli olmalıdır.

- su kaynakları ve drenajlar;
- taşınabilir yakıt besleme sistemi;
- yeterli havalandırma;
- motor egzozunun (yanmış gazların) dışarıya atılması için düzenlemeler;
- gerekli minimum ses yalıtımı;
- yeterli yangın ve güvenlik önlemleri;
- yeterli elektrik güç üniteleri, kaynakları.



Şekil 5.2. Bremze motor-kontrol odası konumu (A.J. Martyr & M.A. Plint, 2007)

Şekil 5.2’de görülen bremze kontrol masası ile motorun konumları görülmektedir. Burada kontrol odası, motor eksenine paralel uzantıda tasarlanmıştır. Bunun sebebi motoru daha geniş açıdan gözlemlemenin yanında, oluşabilecek tehlike anında hasarı ve riski minimum seviyeye indirmektir.

Bir bremze genellikle üç ana sistemden oluşmaktadır. Bunlar; veri toplama ve değerlendirme sistemi, motor kontrol sistemi ve yardımcı ekipmanlar kontrol sistemidir. Her ana sistem aşağıdaki gibi alt sistemlerden oluşmaktadır (Uçar ve Karakiş, 2009).

Yardımcı Ekipmanlar Kontrol Sistemi

1. Yardımcı Ekipmanlar PLC (Programmable Logic Controller) sistemi
2. Yardımcı Ekipmanlar HMI (Human Machine Interface) Sistemi
3. Kapalı Devre Kamera ve TV Sistemi
4. Hava Şartlandırma Sistemi
5. Yağ Sistemi
6. Yakıt Sistemi
7. Güç Sistemi
8. Hava İstasyonu Sistemi

Motor Kontrol Sistemi

1. Motor Kontrol PLC Sistemi
2. Motor Kontrol HMI Sistemi
3. Throttle Kontrol Sistemi
4. Motor Güvenlik Parametreleri Kontrol Sistemi
5. Basınç Ölçüm Sistemi
6. Akış Ölçüm Sistemi
7. Devir Ölçüm Sistemi
8. Sıcaklık Ölçüm Sistemi

Veri Toplama ve Değerlendirme Sistemleri

1. Sıcaklık Ölçüm Sistemi
2. Basınç Ölçüm Sistemi
3. Vibrasyon Ölçüm Sistemi
4. Konum Ölçüm Sistemi
5. Akış Ölçüm Sistemi
6. Devir Ölçüm Sistemi
7. Hava Ölçüm Sistemi
8. Veri Toplama ve Değerlendirme Donanım ve Yazılım Alt Sistemi

5.1.2.1. Yakıt sistemi

Yakıt sistemi kurulurken motorun ihtiyaç duyduğu debi ve basınç isterlerine göre sistemin kurulması önemlidir. Havacılık standartlarına uygun, uzun ömürlü, hafif, dayanıklı ve motora kolayca sökülüp bağlanabilen bir yapı olması gerekmektedir.

Yakıt sistemi yakıtı gerekli debide pilot ve ana yakıt enjektörleriyle yanma odasına ileterek yanma olayının gerçekleşmesini sağlar. Pistonlu motorlara benzer algoritma burada da çalışmaktadır. Enjektörlerden gelen yakıt, ağız kısmından giren hava ve ateşleme sistemi ile kıvılcım oluşturarak yanmayı gerçekleştirir. Yakıt sistemi motora gönderilmeden kullanıcının talebi üzerine bazı ölçümlere ihtiyaç duyabilmektedir. Bu tasarım tamamen kullanıcının talebi ve ihtiyaçları doğrultusunda belirlenebilmektedir. Örneğin, hat üzerinde basınç ölçerler, sıcaklık ölçerler, debimetrelerin yanı sıra ihtiyaca göre basınç düzenleyici valfler, filtreler, hattaki dalgalanmayı sönmölemek amacıyla akış ve titreşim dalga sönmöleyicileri, on/off vanalar, akış dağıtıcılar vb. kullanılabilir. Daha çok noktadan ölçüm almak her ne kadar kullanıcının inisiyatifinde olsa bile, hat üzerindeki kontrolümüzü ve oluşabilecek riskleri fark etmemizdeki ihtimali arttırmaktadır.

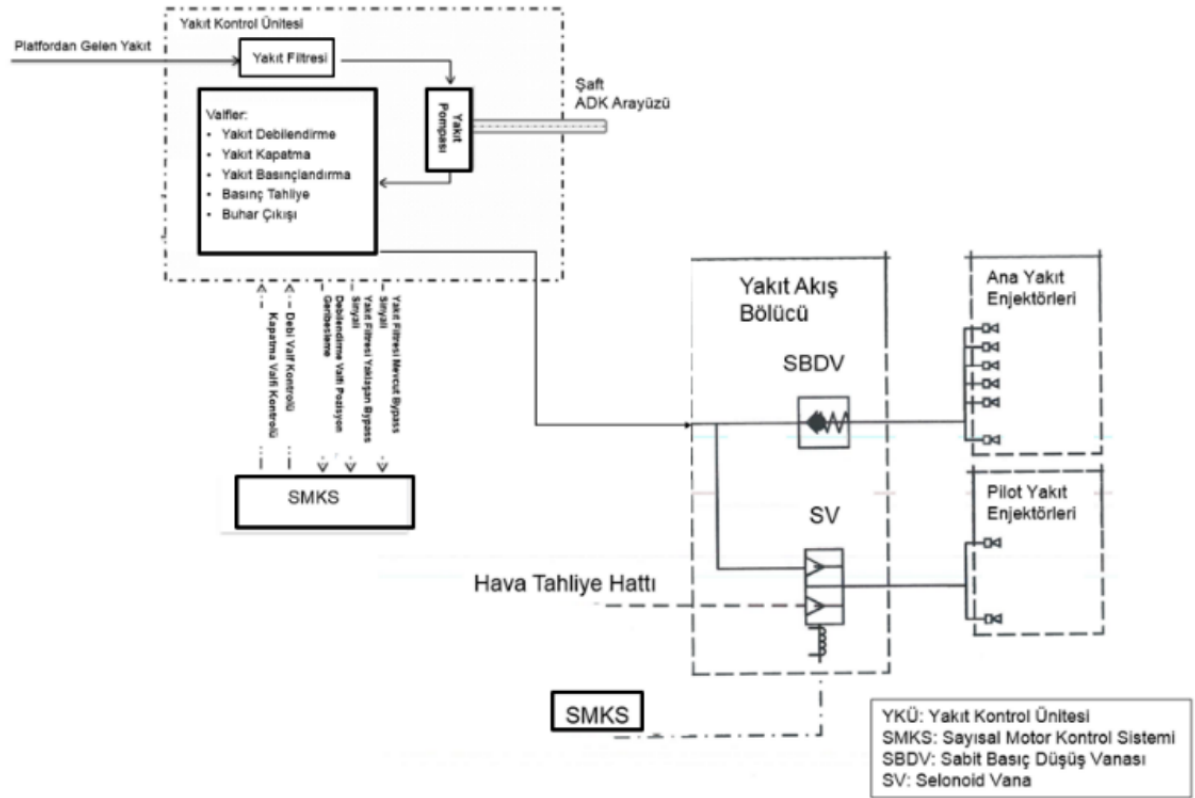
Ateşleme sistemi, yanma odasındaki yakıtın ateşlenmesi için; platformdan gelen düşük voltajı yüksek voltaja çevirir, yüksek voltajı bujilere iletir ve yüksek voltaj ile kıvılcım oluşturur. Ateşleme ünitesinin bir örneği Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Ateşleme ünitesi/buji (TEI, 2020)

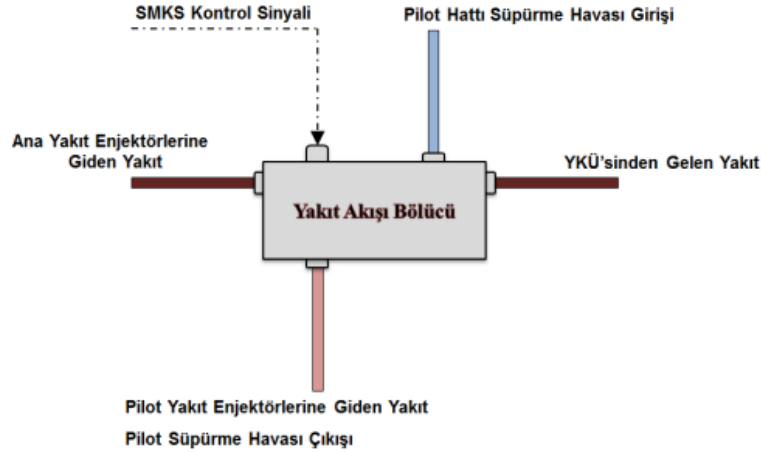
Bremze altyapısında yakıt sistemi iki şekilde kullanılabilir. Bu kullanım motorun aksesuar dişli kutusu (ADK) üzerinde olup olmamasıyla doğrudan ilişkilidir. Geliştirme aşamasında olan motorlarda ADK motor üzerinde bulunmayabilir. Sertifikasyonlu hazır motorlarda ise ADK motor üzerinde bulunmaktadır. Bu iki yöntemle göre yakıt sistemi konfigürasyonu açıklanacaktır. Bunu açıklamadan önce yakıt kontrol ünitesi (FMU) ve yakıt akış bölücünden (FFD) bahsedilmesi gerekir.

FMU yakıtın debisini, pompalanması, filtrelenmesi ve kesilmesini motor kontrol ünitesi (MKÜ) üzerinden aldığı komuta göre uygulamaktadır. Aksesuar dişli kutusu üzerinden tahrik alır. Şaft hızı motora göre değişmektedir. Genellikle yapısında yakıt pompası, bağlantı kelepçe arayüzü, yakıt filtresi ve yakıt kontrol vanası bulundurmaktadır.



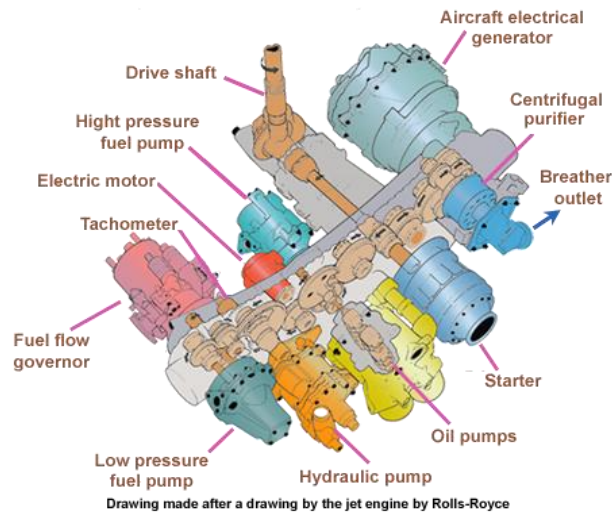
Şekil 5.4. Örnek yakıt şeması (TEI, 2020)

FFD ise ana ve yakıt hatlarının debi ve basıncının kontrol edilmesini sağlar. Motor ateşleme öncesi ana yakıt hattına nispeten daha az miktarda yakıtı, tasarımcının belirlediği birkaç pilot yakıt enjektörüne göndermektedir. Bu 1-2 pilot hat enjektörüne iletilen yakıt ilk ateşlemenin gerçekleşmesini sağladıktan sonra, devreye tüm ana yakıt enjektörleri dahil olarak asıl yanma olayını gerçekleştirir. Yakıt kontrol ünitesi debilenmiş ve basınçlanmış yakıtı, yakıt akış bölücüyü iletir. Yani ana tek hattan gelen yakıtı ana ve pilot hat olmak üzere ikiye ayırır. FFD de MKÜ tarafından kontrol edilmektedir. Yapısında ana yakıt hattı için sabit basınç düşürücü vana ve pilot yakıt hat içinse selenoid vana veya çek valf bulundurmaktadır. Yakıt akış bölücü sistemin sistematığı Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



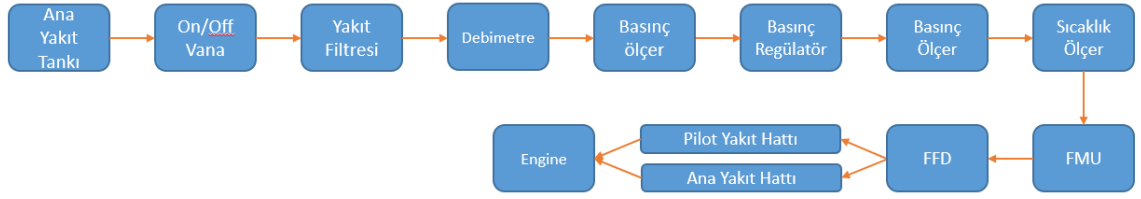
Şekil 5.5. Yakıt akış bölücü sistematığı (TEI, 2020)

ADK'lı motorlarda yakıt kontrol ünitesi ve yakıt akış bölücü motor üzerinde, aksesuar dişli kutusu ünitesinde yer almaktadır. Burada bremze altyapısının görevi yapılacak olan testlerde motorun ihtiyacı olan yakıtı doğrudan yakıt kontrol ünitesine ulaştırmaktır. Yakıtı ulaştırırken yine tek olan ana hat üzerinden debi, basınç, sıcaklık gibi ölçümleri alarak filtreleme işlemlerini yapar ve yakıtı yakıt kontrol ünitesine ulaştırır. Yakıt kontrol ünitesine ulaşan yakıt MKÜ'den aldığı komuta göre yakıtı motora ulaştırır. Bu esnada FMU ve FFD aksesuar dişli kutusu üzerinde yer aldığından tek hattan gelen akışı motor üzerinde ikiye bölerek ilgili pilot ve ana hatta iletir. Bu esnada FMU'yu tahrik eden aksesuar dişli kutusu Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Temsili aksesuar dişli kutusu (TEI, 2020)

ADK'sız motorlarda, yakıt kontrol ünitesi ve yakıt akış bölücü motor üzerinde yer almadığı için, bu noktada bremze altyapısından destek gerekmektedir. Temel destek ihtiyacı, ADK'lı motorda aksesuar dişli kutusu üzerinden sürülen FMU ve FFD'nin, bremze altyapısında sürülmesidir. FMU, harici bir elektrik motoru tarafından tahrik edilmekte ve FFD akışı ikiye bölerek pilot ile ana hatta yakıtı göndermektedir. Bu işlemler tamamen bremze altyapısındaki ekipmanlar ve yakıt hortumlarıyla sağlanır.



Şekil 5.7. Temsili bremze yakıt sistemi

Motora gönderilen yakıt hattı üzerinden alınan ölçümler son derece kritiktir. Fabrika ana yakıt tankından gelen yakıt basıncı, debisi ve sıcaklığı motoru doğrudan etkileyebilmektedir. Bu sebeple motora gönderilmeden hemen öncesinde kontrol edilmek zorundadır. Motorun ihtiyacı olan basınçta, debide ve performans hesaplarıyla uyuşan bir sıcaklıkta gönderilmesi gerekmektedir. Örneğin ana hat basıncınız 7-8 bar olabilir ancak motorun ihtiyaç duyduğu veya ekipmanların çalıştığı basınç aralığı bu basıncın altındaysa bunu basınç regülatörleri ile düzenleyerek motora iletilmesi gerekir. Aynı şekilde motora iletilen yakıt debisi doğrudan motorun hızına etki edecektir. Her ne kadar FMU-FFD ikilisi motorun ihtiyaç duyduğu yakıt debisini MKÜ üzerinden aldığı komutla ayarlayabiliyorsa bremze altyapısında motora en yakın yerden ölçüm alarak bunu ölçerek test esnasında kontrol etmeniz ve MKÜ'ye de sistem üzerinden geri dönüş vermeniz gerekmektedir. Ana hat üzerinde oluşabilecek kir, toz, pislik, talaş gibi kalıntıları yakıtla birlikte motora iletmemek için filtre gibi yardımcı elemanların kullanılması gereklidir. Ayrıca, kullanıcının sisteminin bakımını yapabilmesi ve kontrolünü sağlayabilmesi için sisteme eklenen bir on/off vana fayda sağlar. Şekil 5.7'de bu mantalite ile hazırlanan örnek rastgele bir şema bulunmaktadır. Yukarıda da belirttiğim üzere, bu tasarım detayları kullanıcının talepleri ve ihtiyaçları doğrultusunda belirlenir.

5.1.2.2. Yağlama sistemi

Yağlama sistemi, tüm dişliler, yataklar ve kavramalarda yağlama ve soğutma sağlamak için gereklidir. Aynı zamanda yağlar içinde çalıştığı bir yatak yuvasında veya dişli kutusu içerisindeki yabancı maddeleri toplayabilmelidir. Ek olarak, yağ korozyona dayanıklı olmayan malzemelerden üretilen parçaları da korumalıdır. Bu görevleri yerine getirirken yağın nitelikleri bozulmamalıdır.

Yağlama sistemi de yakıt sistemine benzer şekilde motorun belirli bölgelerine ve rulman yataklarına belirli debi ve basınçta akış sağlamalıdır. Motorda ki yağlama sisteminin temel görevleri:

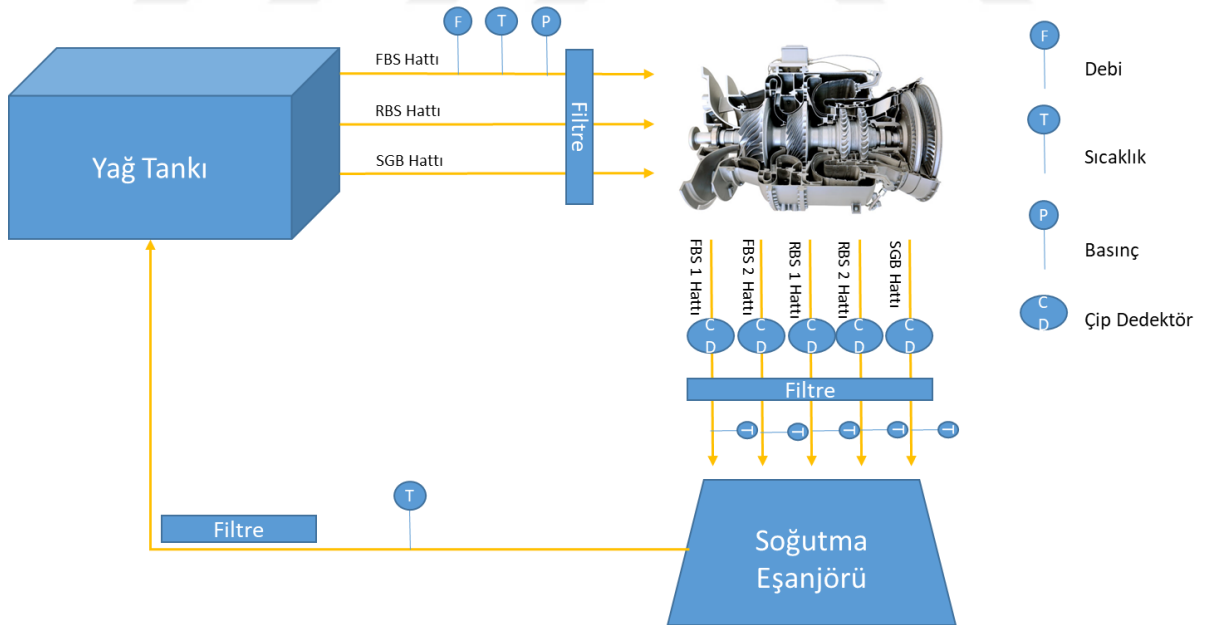
- Sürtünme ve aşınmaların azaltılması,
- Sürtünme sonucu oluşan ısının sistemden uzaklaştırılması,
- Rulman, dişli gibi parçaların soğutulması,
- Yağlanan bölgelerde biriken parçacıkların uzaklaştırılması,
- Yağlanan yüzeylerde korozyonun önlenmesi,
- Taşıyıcı yapıların ısıtılarak buzlanmanın önlenmesidir.

Özellikle AR-GE seviyesindeki motorlar gelişme sürecinin başlarında yakıtta olduğu gibi bremze altyapısından desteğe ihtiyaç duyar. Aksesuar dişli kutusu üzerinde olmayan konfigürasyonlarda motora altyapıdan yağ besleme ve scavenge (emiş) şeklinde destek verilmektedir. Motorun az önce bahsettiğimiz görevleri yerine getirebilmesi için yağlama kritik öneme sahiptir. Birçok kritik rolünün yanı sıra özellikle rulman ve dişlilerin soğutulması konusu doğrudan motor sağlığını etkilemektedir.

Motorlarda bulunan rulman yatakları nozul deliklerinden yataklara yağı pülverize şeklinde iletmektedir. Yağ sağlıklı ve ihtiyacı olan şekilde yataklara iletilmez ise parçaların birbirine sürtmesi, belki parça kopması ve sonucunda şaftı yataklayan yatakların dengesinin bozulması sonucu ana şaftı dahi dağıtma riski bulunmaktadır. Bu da motorun tamamen işlevini yerine getirememesi ile sonuçlanacağından dolayı, yağlama son derece önemlidir.

Genellikle turboşaft motorlarında, yağlama ihtiyacını karşılamak üzere 3 ana bölge belirlenir. Bu bölgeler ön yatak kısmı FBS (front frame structure) , arka yatak kısmı RBS (rear frame structure) ve aksesuar tarafı olarak nitelendirdiğimiz AGB bölgeleridir. Motorun içine bu üç bölgeden beslenen yağ motorun tasarımına bağlı olarak belirlenen bölgelerden, scavenge (emiş) edilerek tekrar ana tanka döneceği şekilde bir kapalı sistem tasarlanır. Bu bölgeler ve sayılar tamamen motor tasarımcısına bağlıdır. Sistem tasarlanırken elbette yine her bir hatta debi, basınç ve sıcaklık ölçümleri alınabilir. Bu sistemler PLC üzerinden kontrol edilebilir ve motor RPM devrine bağlı olarak ihtiyaç duyduğu yağı motora besler. Yağ beslemesinin görevlerinden biri de yataklarda biriken parçacıkların uzaklaştırması olduğundan, sistem üzerinde filtre bulunması faydalı olacaktır. Bu filtreler sık sık kontrol edilmeli, temizlenmeli ve gerekirse yenilenmelidir. Çünkü ana tanka geri dönerek biriken yağ motora tekrar besleneceğinden dolayı motorun içerisine pislik gitme ihtimali oluşur. Bu sebeple hem besleme hem de scavenge hatlarına filtre koyulmalı, hatta çip dedektör koyulması da değerlendirilmelidir.

Şekil 5.8’de basitçe bir yağlama sistemi şeması çizecek olursak:



Şekil 5.8. Temsili bremze yağlama sistemi

Motora gönderilen yağ motordan ısınarak çıkacaktır. Scavenge edilen yağ ana tanka dönmeden önce tekrar soğutularak gönderilmesi önemlidir. Bu sebeple araya soğutma eşanjörü koyularak ısınan yağ ana tank yağ sıcaklığına soğutulup, gönderilebilir.

Nihai tasarımına yaklaşan ve aksesuar dişli kutusu üzerinde olan motorlarda ise motor üzerinde yağ pompası bulunmaktadır. Bu yağ pompası aksesuar dişli kutusu üzerinden tahrik alır ve yağı motora pompalar. Yukarıda anlattığımız sistem motor üzerinde havacılık standartlarına uygun, yüksek hızda, yük ve titreşim altında çalışabilen, toz, yağ buharı, kum ve sıcaklık gibi dış etkenlere dayanabilen, teknik isterleri karşılayabilen, bakımı veya değişimi yapılabilecek şekildeki kurgusuyla yer almaktadır.

Motor yağlamasından bahsettiğimizde yataklardan özellikle bahsetmekte fayda vardır. Motor ana yatakları, rotorların statorlara göre doğru şekilde konumlanması için kullanılır. Yataklar, motorların iç akış yolunda (contalar, kanatlar ve kanatçıklar gibi bileşenler) küçük eksenel ve radyal çalışma boşluklarını kullanarak iyi bir motor performansını sağlamak için vazgeçilmezdir. Uçak gaz türbinlerinde kullanılan yatakların neredeyse tamamı radyal yuvarlanma (rolling) eleman tipindedir ve genellikle silindirik masuralı veya bölmeli halka tipindeki bilyalı yataklardır. Bilyalı (ball) yataklar eksenel veya radyal rotor desteğini sağlarken, masuralı (roller) rulmanlar sadece önemli radyal destek sağlayabilir.

Uçak motorlarında dönen yatakların kullanımının temel nedeni;

- Ağırlığı en aza indirmek (özellikle trust/itki yataklarında)
- Kırım ve güç kaybını en aza indirmek,
- Yağ akışı ve soğutma gereksinimlerini azaltmak,
- Manevra yükleri, sert iniş yükleri gibi önemli kısa zamanlı aşırı yükleme ve “turbomakine” hasarına bağlı yüksek dengesiz yüklere (airfoil loads) dayanma yeteneğine sahip olmasını sağlamaktır.

Birçok yönden, jet motoru yatakları (rulmanlar) otomobillerde ve endüstriyel ekipmanlarda kullananlara benzer ancak üç önemli farklılık vardır. Jet motoru yataklarda genellikle diğer endüstriyel yataklara kıyasla daha yüksek hızlarda, daha yüksek yüklerde

ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışmak zorundadır ve daha verimli motorlara veya daha yüksek performanslı uçaklara yönelik eğilim devam ettikçe yataklar için çalışma ortamı gittikçe zorlu hale gelir.

Bununla birlikte, rulmanların sıcaklık kapasitesi, motor akış yolunun yatağa çok yakın olan alanlarına göre daha sınırlıdır. Günümüzde kullanılan yataklar 600 °F'ye kadar çalışabilir ancak 400 °F ile sınırlandırılmış sentetik yağlarla soğutulmaktadır. Yatak boşluğunda veya haznede dişli varsa, sıcaklıklar 350 °F ile sınırlandırılmalıdır. Buna kıyasla, kompresör çıkış sıcaklığı genellikle motorlarda 1100 °F'yi ve türbin giriş sıcaklıkları, akış yolunda 2000 °F'yi aşan bir sıcaklıkta ilerlerken yatak haznesine yalnızca birkaç inç uzaklıktadır. Yatakların, dişlilerin ve yağlama yağının aşırı ısınmasını önlemek için, bu sıcak akış yolu havasının yatak toplama noktalarına ulaşmasını önlemek gereklidir ve bunun için sızdırmazlık sistemi sağlanmalıdır. Ayrıca yağlama yağı akışı, hızlarından ötürü rulmanlar tarafından dahil olarak üretilen ısının taşınması için yeterli olacaktır (Giampaolo, 2020).

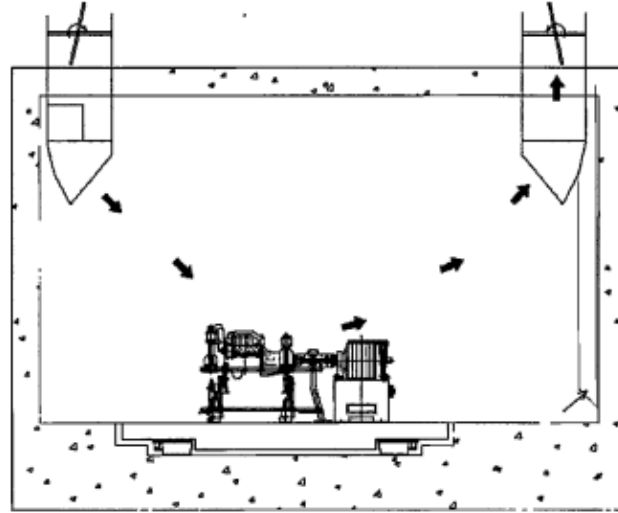
5.1.2.3. Bremze giriş havası air-inlet

Bir içten yanmalı motor esasında bir turbo kompresör olduğundan, içerisine yüksek miktarda hava çekmesi gerektiği ihtiyacı unutulmamalıdır. Bu hava genellikle ortamdan bremzeye filtreme işlemiyle getirilmesi gerekmektedir. Kaynağı ne olursa motorun gücü ve performansı, giriş ağzından motora giren havanın sıcaklığı, basıncı ve nemiyile doğrudan ilişkilidir. Şekil 5.9'da örnek bir hava akış sirkülasyonu gösterilmiştir.

Havalandırma ve hatta bazı özel durumlarda bu havanın iklimlendirilmesinin amacı, kapalı bir alandaki ortamın sürdürülmesidir. Bu insanların doğal yaşadığı bir ortam için her ne kadar basit görünse de, bir gaz türbinli motorun çalıştığı nispeten küçük ortam için daha zor bir hal alır. Bir yandan bremze odasına basılan dış ortam havası, bir yandan ise motordan çıkan yanmış gazların dışarı atılması sirkülasyonu sürekli devam etmektedir. Bu işlem gerçekleşirken yüksek sıcaklık altında çalışan bir gaz türbinli motor, termal yüklerde ve yüksek hızlarda çalışmasına devam etmek zorundadır.

Test hücreleri için havalandırma sistemleri yalnızca ısıyı uzaklaştırmakla kalmaz, aynı zamanda tehlikeli seviyelerde gaz ve buhar oluşumunu da önler. Bu tür gereksinimler,

özel olarak tasarlanmış buhar tahliye sistemleri ve hücre boyunca yeterli hava akışı sağlanarak karşılanır. Bir motor tarafından üretilen ısıyı gidermek için gereken akış, çoğu normal koşulda egzoz gazlarını temizlemek için genellikle yeterli hava akışı sağlar ve hücre alanının ortam basıncının biraz altında çalışmasını sağlayarak bu tür gazların diğer çalışma alanlarına itilmesini önleyecektir (A.J. Martyr ve M.A. Plint, 2007).



Şekil 5.9. Bremze hava akış sirkülasyonu (A.J. Martyr & M.A. Plint, 2007)

İhtiyaç duyulan bremze giriş hava miktarı motora göre değişmektedir. Motor çalışmaya başladığı an da, ihtiyaç duyduğu bu hava miktarını bremzelere yerleştirilen hava giriş (air inlet) kısmından güçlüce içerisine çeker. İhtiyacı olan havayı içerisine aldıktan sonra ilk başlıklarda bahsettiğimiz gaz türbinli motor çalışma prensibinde anlattığımız gibi sırasıyla kompresör-yanma odası-türbin ve egzoz şeklinde kullanarak tekrar dışarıya atmaktadır. Bu hava hem motor çalışmasında hem de motorun soğutma hatlarında kullanılmaktadır. Ayrıca ortama giren bu havanın bremzenin uygun görülen bir noktasından sıcaklık, basınç ve nem değerleri ölçerek, motor performans hesaplamalarına doğrudan katkı sağlar.

Bremzede testleri yapılan gaz türbinli motorlarda düzeltilmiş hız hesabı yapılır. Gaz türbinli motor performansının farklı çalışma koşullarında karşılaştırılabilir hale getirilmesini sağlamak amacıyla kullanılır. Düzeltilmiş hız, genellikle standart atmosfer koşulları altında motorun hızını ifade eder. Bu, farklı rakım, sıcaklık ve basınç koşullarındaki motor

performansını standart bir referans noktasına göre değerlendirmek için kullanılır. Bu hesaplamaların neden yapıldığına dair bazı ana nedenler:

Karşılaştırılabilirlik: Farklı yüksekliklerde veya farklı sıcaklık ve basınç koşullarında çalışan motorları karşılaştırmak için düzeltilmiş hız hesaplamaları yapılır. Bu sayede, motorların aynı standart atmosfer koşullarında nasıl performans gösterdiği anlaşılabilir.

Performans Tahmini: Düzeltilmiş hız, motorun teorik olarak standart atmosfer koşullarında ne kadar hızlı çalışabileceğini gösterir. Bu, motor performansının tahmin edilmesinde ve optimize edilmesinde yardımcı olabilir.

Motor Verimliliği Analizi: Düzeltilmiş hız hesapları, motorun verimliliğini değerlendirmek için kullanılabilir. Farklı çalışma koşullarında motorun nasıl performans gösterdiğini anlamak, enerji verimliliğini artırmak için önemlidir.

Uçak Tasarımında Kullanımı: Havacılık alanında, uçak motorlarının performansını değerlendirmek için düzeltilmiş hızlar sıkça kullanılır. Bu, farklı irtifalarda veya sıcaklık koşullarında uçak motorlarının performansını anlamak için önemlidir.

Düzeltilmiş hız hesaplamaları genellikle RPM (devir/dakika) bazında yapılır ve standart atmosfer parametrelerine göre düzeltilir. Bu hesaplamalar, motor üreticileri, tasarımcılar ve mühendisler için önemli bir araçtır, çünkü farklı çalışma koşullarında motor performansının anlaşılmasına ve optimize edilmesine yardımcı olurlar.

5.1.2.4. Dinamometre

Turboşaft motorların turbojet motorlarından en önemli farkı güç türbininin bulunmasıdır. Kompresör ve türbin ile dönen şafttan farklı olarak bulunan güç türbini şaftı helikopter pervanesini tahrik eder. Bu şekilde helikopterin pervane açıları değiştirilerek kullanılan güç oranı değiştirilir ve havalanmasını sağlar.

Mekanik bir sistem ile güç aktarımı olan motorlarda yani turboprop ya da turboşaft motorlarda şaft ile motorun ürettiği güç/tork/hız dinamometre aracılığıyla ölçülebilir.

Dinamometrelerin temel gereksinimi buradan doğmaktadır. Bir dinamometre veya kısaca "dyno", kuvveti, kuvvet momentini (tork) veya gücü ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Örneğin, bir motor, motor veya başka bir dönen ana taşıyıcı tarafından üretilen güç, aynı anda tork ve dönüş hızı (RPM) ölçülerek hesaplanır.

Bir motor dinamometresinde, istenen uygulanan yük ile orantılı su akışı, motora direnç oluşturur. Giriş manifoldundan kontrollü bir su akışı, her bir absorpsiyon bölümünde rotorun merkezine yönlendirilir. Bu su daha sonra merkezkaç kuvveti ile dış dinamometre gövdesine atılır. Dışa doğru yönlendirildiği için su, yavaşlatıldığı sabit stator plakaları üzerindeki ceplere hızlandırılır. Sürekli hızlanma ve yavaşlama, dinamometrenin motor tarafından üretilen gücü emmesine neden olur. Bu enerji transferi sayesinde su ısınır. Isınan su soğutucu eşanjörden geçerek soğutulur ve ana su havuzuna tekrar döner. Bu şekilde ana havuz-bremze iç havuzu-dinamometre-eşanjör-ana havuz olmak üzere bir kapalı çevrim sistemi oluşturur.

Birden fazla dinamometre çeşidi bulmak mümkündür. Bu dinamometrelerin çalışma prensibi genel olarak ortaktır. Dinamometrelerin bir girişi bir çıkışı olduğunu düşünürsek bu giriş ve çıkış sayesinde su, hava gibi kaynaklarla istenilen tork veya güçte tutmasını sağlar. Giriş ve çıkış valf açıklıklarını bazen otomatik şekilde bazen ise test operatörünün manuel olarak kontrol etmesiyle birlikte motor şaftını istenilen seviyede tutar.

Bu sistem, teorik olarak karmaşık görünen bir yapıya sahip olsa da, aslında motor şaftını bir dyno şaftına bağlayarak karşı bir yük uygular. Bremze bağlı bu sistem, dinamometre aracılığıyla helikopter pervanelerine güç aktarımını simgeler. Bu süreçte tork, hız ve güç ölçümleri gerçekleştirilir (Lish, 2015).

Bir bremze kurulurken verilmesi gereken en zor kararlardan birisi nasıl bir dinamometre türü seçilmesi gerektiğidir. Dinamometrelerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu kısımda dinamometrelerden ve farklı tip dinamometrelerin (su frenli, hava frenli ve AC dinamometre) çalışma prensibinden bahsedilecektir.

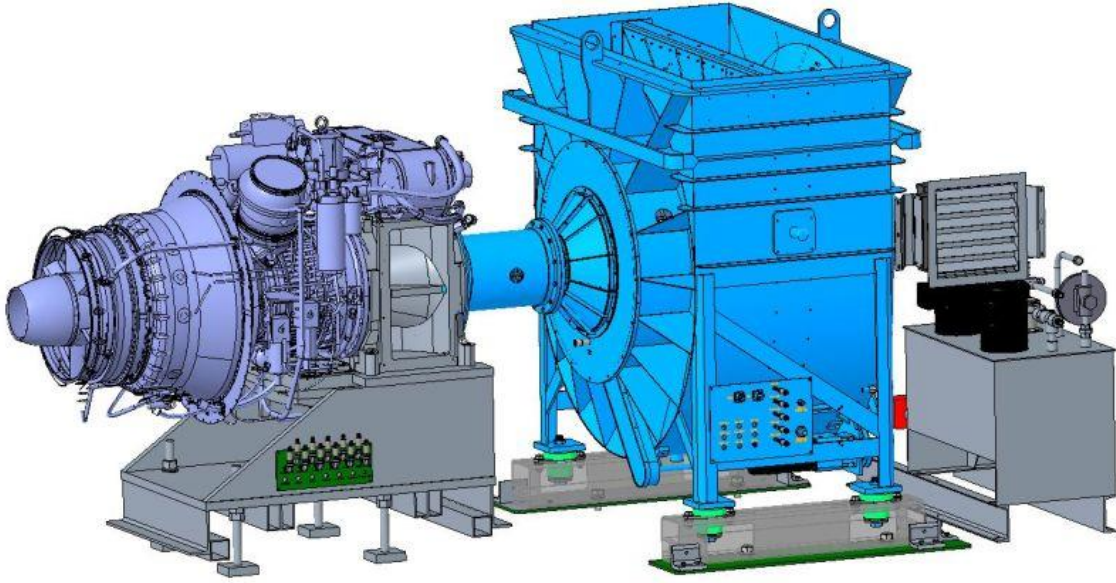
tepki verebilmesidir. Aynı zamanda su soğutma sistemi ihtiyacı olmadığından ekstra bir sisteme ihtiyaç duymamaktadır. Ancak A/C dinamometreler elektrik enerjisi kullanarak frenleme yaptığı için yardımcı sistem olarak elektrik altyapısına ihtiyacı vardır. Motorun gücüne bağlı olarak bu altyapı ihtiyacı artabilir, bu da yerleşim açısından kritik önem kazanabilir. Ayrıca şaftın dönüş yönüne bağlı olarak frenleme yaparken elektrik üretebilir ya da şafta ters yönde güç verip; motora enerji ileterek çalışabilirler. Yani A/C dinamometreler iki yönlü de çalışabilirler. Bu sebeple A/C dinamometreler, aktif dinamometreler olarak da adlandırılır. A/C dinamometre Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. A/C dinamometre (Dyno Equip, 2023)

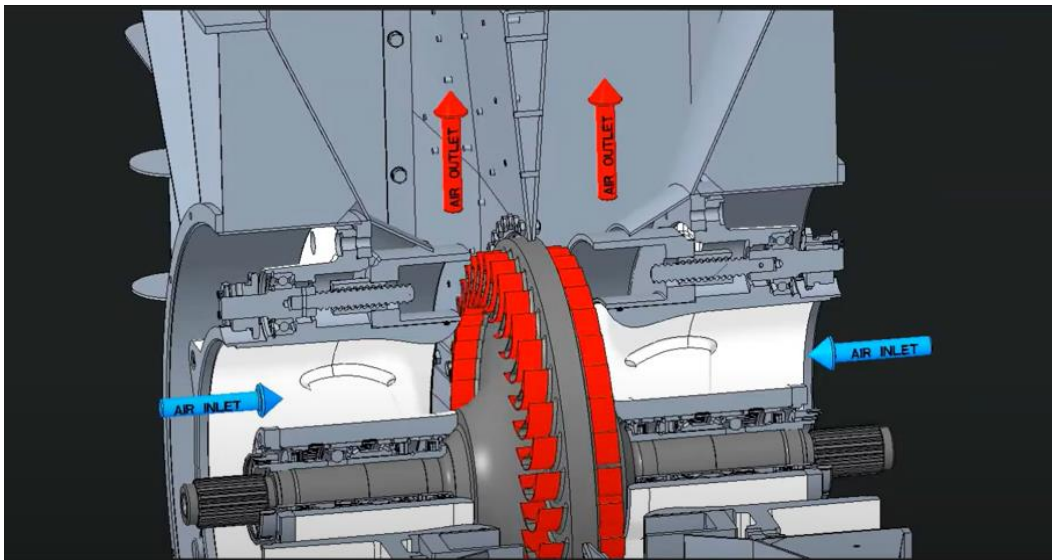
Hava Frenli Dinamometreler

Hava frenli dinamometrelerde, kompresör şaftı ile motor şaftı birbirine bağlanır ve mekanik olarak sistemi oluştururlar. Hava frenli dinamometre Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Kompresörün ortamdan aldığı havayı sıkıştırarak oluşturduğu karşı güç motor şaftını frenleyerek motor gücünü ölçer. Dinamometrenin iki tarafından alınan ortam havasının bir kısmı kompresörü çevirmede kullanılırken, bir kısmı da üst kısmından dışarı atılır (Exhaust Air).



Şekil 5.12. Hava frenli dinamometre (McLean, 2022)

Hava frenli dinamometreler temel olarak havayla ürettiği mekanik enerji ile frenleme yaparlar. Ancak yer testlerinde kullanılan bu sistemde tork ölçümü ya da tork değişimi yapabilmek için değişken alanlı radyal kompresör bulunmaktadır. Hava frenli dinamometrenin iç yapısı Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Kompresör pallerinin üzerinde havanın kullanım oranını belirleme olanağı tanıyan bir sistem mevcuttur. Tork isteğine göre bu palelerin havayı kullanım oranı arttırılarak sistemin daha fazla fren yapması sağlanır.



Şekil 5.13. Hava frenli dinamometrenin iç yapısı (McLean, 2022)

Özellik	Hidrolik Dyno	A/C Dyno	Hava Dyno
Sistem Boyutu	Büyük	Büyük	Küçük
Yrd. Sistem Boyutu	Büyük	Büyük	Küçük
Yerleşim	Taşınamaz	Taşınabilir	Taşınabilir
Maksimum Hız (rpm)	30000	20000	30000
Soğutma Türü	Su	Su	Ortam Havaası
Güç (shp)	~75000	~6000	~25000
Dışli Kutusu	Yok	Var	Yok
Kurulum Maliyeti	Orta	Yüksek	Orta
İşletme Zorluğu	Yüksek	Orta	Düşük

Motorun dinamometreye bağlanması için uygun kaplinlerin ve şaftın seçilmesi akabinde hizalama işleminin doğru yapılması oldukça önemlidir. Yanlış seçim veya hatalı sistem tasarımı bir dizi soruna yol açabilir:

- burulma salınımları,
- motor veya dinamometrenin titreşimi,
- kaplin milinin dönmesi,
- motor veya dinamometre yataklarında hasar,
- şaft hattı bileşenlerinin aşırı aşınması,
- kaplin millerinin katastrofik arızası,
- motor çalıştırma sorunları.

Tüm bu konu, motor ve dinamometre bağlantısı, motor testinin diğer rutin uygulamalarından daha fazla soruna yol açabilir ve ilgili birçok faktörün net bir şekilde anlaşılmasını gerektirir. Dinamometre şaftı ile motor şaftı arasında oluşabilecek bir salgı veya hatalı bağlantı iki tarafa da ciddi zararlar vererek sistemin dağılmasına yol açabilir.

Hizalama işlemi; hem dinamometre kurulumu sırasında hem de dinamometre-motor bağlantısı sırasında önemlidir. Dinamometre test odası altyapınıza ilk devreye alma aşamasında motordan bağımsız şekilde zemine doğru şekilde oturtulmalı ve dinamometre firması tarafından düzgün şekilde hizalanarak sabitlenmelidir. Sabitleme işlemi, düzgün konuma getirildikten sonra dinamometre ayaklarına beton dökülerek veya saplama şeklinde ki bağlantılarla sabitlenebilir. Daha sonra dinamometrenin hizalamasından emin olunduktan sonra motor-dinamometre şaft hizalamasına geçilmelidir. Bu iki bağlantı arasında mikron

seviyesinde hassas hizalama gerekecektir. Dinamometre motor bağlantısı kontrollerinin ve hizalamasının her test öncesi tekrarlanmasına gerek olmasada her ayrı bir motor bağlanırken mutlaka yapılmak zorundadır. Genellikle dinamometre firmaları hizalama toleranslarını belirtirler.

Bir şaft sistemi tasarlanırken ve monte edilirken, kütle ve dengesiz kuvvetler tarafından uygulanan yüklerin bir uçtaki motor yatağının ve diğer uçtaki dinamometrenin asılı ağırlık sınırlarını aşmamasına dikkat edilmelidir. Milin civata deliklerini dinamometre flanşına veya motor volanına uyarlamak için gereken çelik adaptör plakaları, rulmanlar üzerindeki yükü önemli ölçüde artırabilir ve sistemin çalışmasını tehlikeye atabilir. Dinamometre üreticileri, dinamometrelerinin kaplin yüzeyinden belirli bir mesafede izin verilen maksimum kütleyi gösteren tablolar üretirler.

Motorun dinamometre ile güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için tasarım ve test süreçlerini kapsayan adımlar aşağıda sıralanmıştır. (A.J. Martyr ve M.A. Plint, 2007).

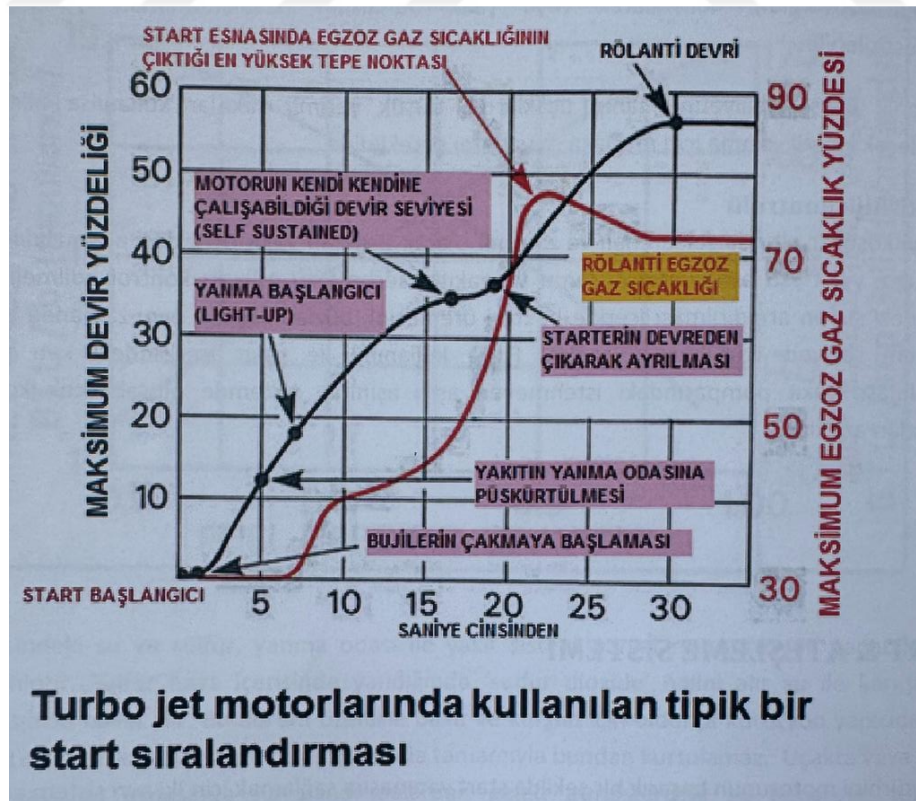
- 1) Motorun hız aralığını ve tork karakteristiğini belirleyin.
- 2) Uygun bir tahrik milinin ön seçimini yapın. Maksimum izin verilen hızın yeterli olduğunu kontrol edin. Tahrik mili gerilmelerini kontrol edin ve malzemeyi belirtin. Olası gerilme arttırıcılarına bakın.
- 3) Üretici önerilerini, yük faktörünü ve diğer kısıtlamaları kontrol edin.
- 4) Motorun ve dinamometrenin dönme momentini, önerilen mil ve kuplaj montajının rijitliğini belirleyin. Torsiyonel kritik hızın ön hesaplamasını yapın. (Büyük çok silindirli motorlarda torsiyonel davranışın tam bir analizini yapmayı düşünün.)
- 5) Gerekliğinde mili uygun şekilde yerleştirmek için mili bileşenlerinin özelliklerini değiştirin. Gerekirse viskoz torsiyonel titreşim damperlerinin kullanımını düşünün.
- 6) Kritik hızlarda titreşimli torkları hesaplayın ve mil bileşenlerinin kapasitesini kontrol edin. Gerekirse hız ve yük için 'geçerli değil' alanlarını belirtin.
- 7) Sarmal hızları kontrol edin.
- 8) Düzeltme gereksinimlerini belirtin.
- 9) Mil koruyucularını tasarlayın.

5.1.2.5. Start & ateşleme sistemi

Bir gaz türbini motorunun başarılı bir şekilde start yapmasını sağlamak için iki ayrı sistem gereklidir. Öncelikle, kompresör ve türbin, yakıt püskürtme nozullarından yakıtle karışması için yanma sistemine yeterli havanın sağlandığı bir devir hızına kadar döndürülmelidir.

İkinci olarak, yanma sistemindeki hava/yakıt karışımının tutuşması için gerekli düzenlemeler yapılmalıdır. Motorun ilk başlatma esnasında iki sistem aynı anda çalışmalıdır, ancak bakım kontrolleri için motoru ateşleme olmadan döndürmek ve sadece uçuş esnasında yeniden ateşleme yapmak (relight) mümkün olmalıdır.

Her iki sistemin de çalışması bir başlatma çevrimi sırasında koordine edilir ve çevrimin bir elektrik devresi ile başlatılmasından sonra bunların işletimi otomatik olarak kontrol edilir. Bir turbo jet motorun başlangıcında tipik bir olay dizisi şekilde gösterilmektedir. Bu olay dizini Şekil 5.14’de gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Turbojet motorda start sıralandırması (Kurban, 2019a)

Start Metodları

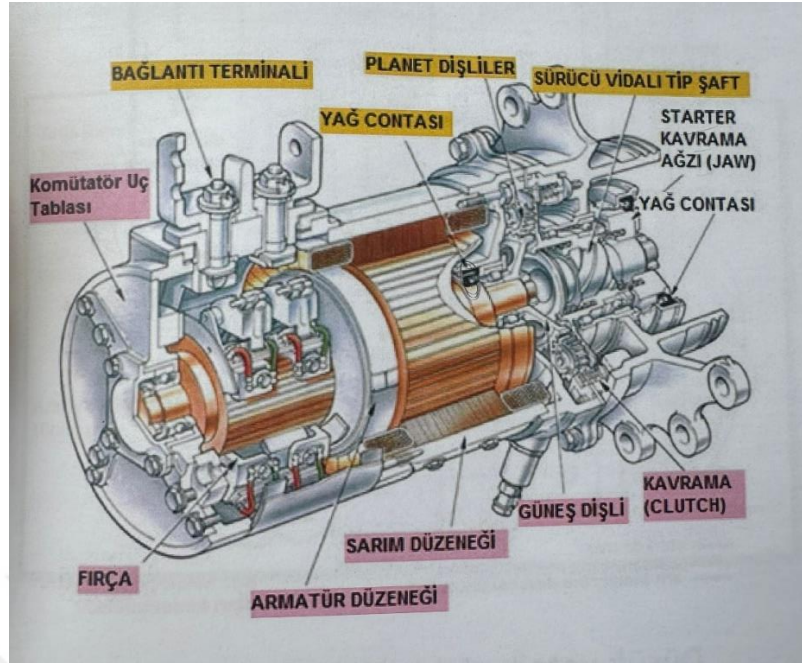
Tüm jet motorlarının çalıştırma prosedürü temel olarak aynıdır, ancak çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Starterin tipi ve güç kaynağı motorun ve uçağın gereksinimlerine göre değişir. Bazıları elektrik enerjisi kullanır, bazıları gaz, hava veya hidrolik basıncı kullanır ve her birinin kendine has özellikleri vardır. Örneğin, bir askeri uçak, motorun minimum sürede çalıştırılmasını ve mümkün olduğunca harici ekipman ihtiyacı olmadan startın gerçekleşmesini gerektirir. Bununla birlikte, ticari bir uçak, motorun yolculara en az rahatsızlık vererek ve en ekonomik yollarla start yapmasını gerektirir. Hangisi kullanılırsa kullanılsın, güvenilirlik birinci derecede önemlidir. Bremze altyapılarında havalı ve elektrikli starterlar diğerlerine göre daha çok tercih edilirler.

Starterin, motorun çalışması için gerekli makul bir devire kadar çıkmasını sağlayacak bir tork üretmesi ve bunu motorun dönen aksamına iletmesi gereklidir.

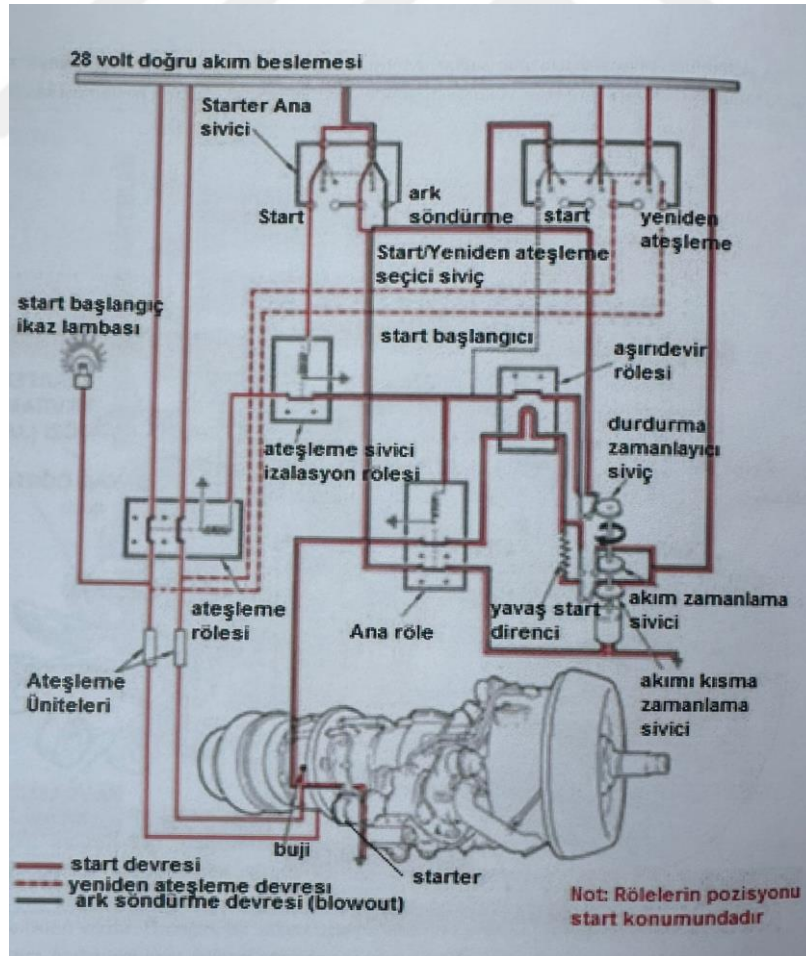
a) Elektrikli Starter:

Elektrikli starter, motoru kendi kendine sürdürebileceği bir hıza (self-sustaining) ulaştırdıktan sonra otomatik olarak ayrılan bir redüksiyon dişlisi ve mandal mekanizması veya kavrama vasıtasıyla motora bağlanan bir doğru akım (DC) elektrik motorudur. Elektrikli starter yapısı Şekil 5.15'te gösterilmiştir.

Elektrik beslemesi, yüksek veya alçak gerilimde olabilir ve marş devrini hızlandığında tam voltajın kademeli olarak oluşturulmasını sağlamak için bir röle ve direnç sisteminden geçirilir. Ayrıca, ateşleme sisteminin çalışması için güç sağlar. Motor, başarılı bir şekilde çalıştığında veya zaman periyodu tamamlandıktan sonra start yükü düştüğünde otomatik olarak elektrik beslemesi kesilir. Elektrikli starter çalışma sistemi Şekil 5.16'da görülmektedir.



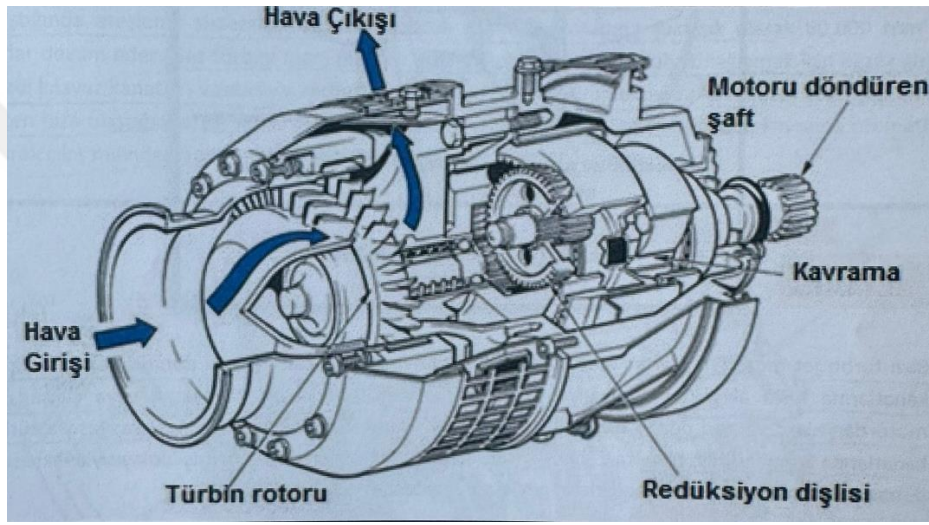
Şekil 5.15. Elektrikli starter (Kurban, 2019a)



Şekil 5.16. Düşük voltajlı elektrikli starter sistemi (Kurban, 2019a)

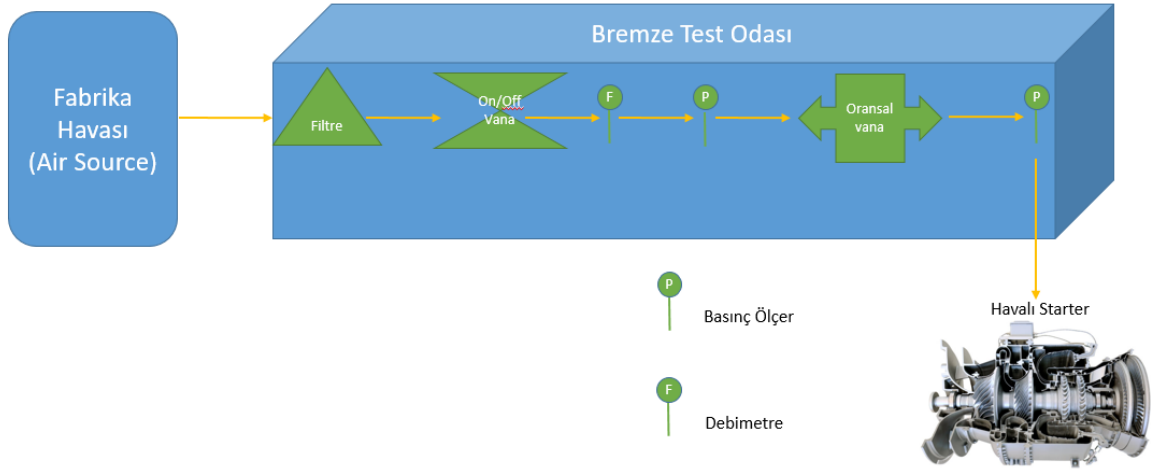
b) Havalı Starter:

Havalı starterler, çoğu ticari ve bazı askeri jet motorlarında kullanılır. Diğer starter sistemlerine göre birçok avantajı vardır ve nispeten hafif, basit ve ekonomiktir. Havalı starter, gücü bir redüksiyon dişlisi ve kavrama vasıtasıyla motora bağlı şafta aktarır. Hava genellikle bina altyapısında bulunan ana hava hattından temin edilir. Tabii ki motora göre verilmesi gereken hava basıncı değişecektir. Bu ayarlama hatta bağlanacak olan bir oransal vana ile düzenlenir. Havalı starter yapısı Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Havalı starter (Kurban, 2019a)

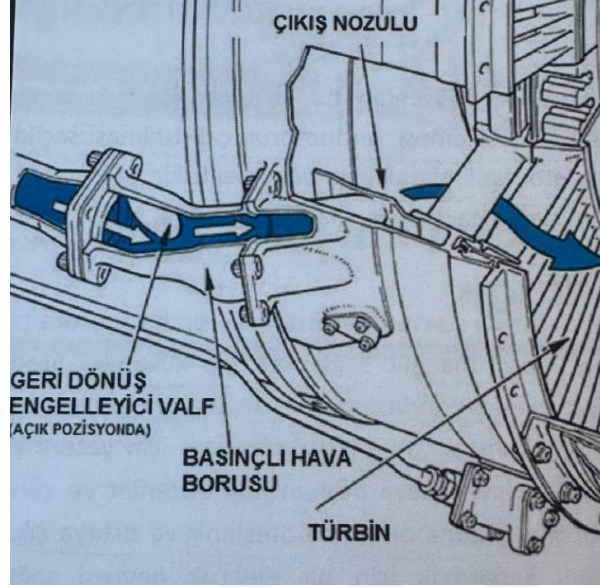
Starter türbini, harici bir yer takat cihazından, bir yardımcı güç ünitesinden (APU) alınan havayla döndürülür. Startere gelen hava beslemesi, bir motorun çalıştırılması seçildiğinde açılan ve önceden belirlenmiş bir start hızında otomatik olarak kapatılan elektrikle çalışan bir kontrol ve basınç azaltıcı valf tarafından kontrol edilir. Kavrama, motor rölanti RPM hızına ulaştığında otomatik olarak ayrılır ve starterin dönüşü durur. Test odası hava başlatma altyapısı temsili gösterimi Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Test odası (bremze) hava başlatma altyapısı temsili gösterim

Bir yanma odalı starter, bazen havalı starter motorunu içeren bir motora takılır ve harici hava temini mümkün olmadığında marş motoruna güç sağlamak için kullanılır. Starter ünitesinde, küçük bir yanma odası bulunur ve içine, uçak üzerinde tüp içine depolanmış yüksek basınçlı hava ve motor yakıt sistemindeki yakıt verilir. Kontrol valfleri, atomizasyon için yeterli yakıt basıncı sağlamak için yakıt akümülatörüne basınç uygulayan hava beslemesini düzenler ve sürekli ateşleme sistemini de etkinleştirir. Yakıt / hava karışımı yanma odasında ateşlenir ve ortaya çıkan gaz, starterin türbinine yönlendirilir. Hava kaynağını kapatmak için bir elektrik devresi sağlanır ve start çevriminin tamamlanmasından sonra yakıt ve ateşleme sistemlerini kapatır.

Bazı turbojet motorları starter motorlarıyla donatılmamıştır, ancak motoru döndürmek için türbin kanatlarına hava akışı (air impingement) uygularlar. Hava harici bir kaynaktan veya çalışan bir motordan alınır ve geri dönüşsüz valfler ve nozzullar (non return valve & nozzles) vasıtasıyla türbin kanatlarına yönlendirilir. Bu tarz bir starter, henüz seri üretime geçmemiş dolayısıyla aksesuar donanımı bitmemiş prototip motorların geçici süreyle testlerinde kullanılabilir. Hava çarpıtmalı start örneği Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



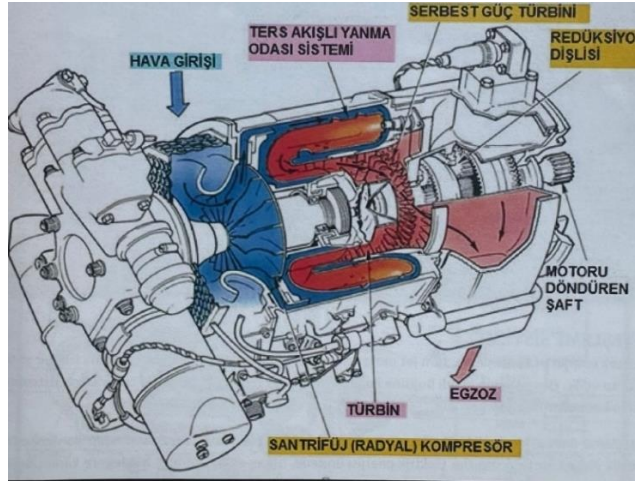
Şekil 5.19. Hava çarptırmalı (impingement) start (Kurban, 2019a)

c) Gaz Türbinli Starterlar:

Bazı jet motorları, gaz türbini starter motoru kullanılır. Bu tip starterlerin kendi yakıt ve ateşleme sistemi, çalıştırma sistemi (genellikle elektrikli veya hidrolik) ve kendine has bir yağ sistemi vardır. Bu tip starter motorlarını kullanmak ekonomiktir ve düşük ağırlıklarına göre yüksek güç çıkışı sağlarlar. Gaz türbini starter motoru Şekil 5.20’de gösterilmiştir.

Starter, genellikle türbinle döndürülen santrifüj kompresör, ters akımlı yanma sistemi ve mekanik olarak bağımsız bir serbest güç türbini içeren küçük, kompakt bir gaz türbini motorundan oluşur. Serbest güç türbini ana motora iki aşamalı “epicyclical” bir redüksiyon dişlisi, otomatik kavrama ve çıkış mili vasıtasıyla bağlanır.

Start çevriminin başlamasıyla birlikte, gaz türbini starter motoru, kendi kendine çalışabileceği devire ulaştığında ateşleme sistemleri otomatik olarak kapanır. Hızlanma yaklaşık olarak 60000 RPM’e kadar devam eder. Gaz türbini marş motoru hızlandıkça, ana motora tahrik sağlamak için egzoz gazı nozül kılavuz kanatları vasıtasıyla serbest güç türbinine yönlendirilir. Ana motor kendi kendine yeten hıza ulaştığında, bir kesici devre vasıtasıyla starter kapatılır. Start bittiğinde, kavrama otomatik olarak çıkış milinden ayrılır ve ana motor kendi gücüyle rölanti devrine ulaşır.



Şekil 5.20. Gaz türbini starter (Kurban, 2019a)

d) Hidrolik Starterler:

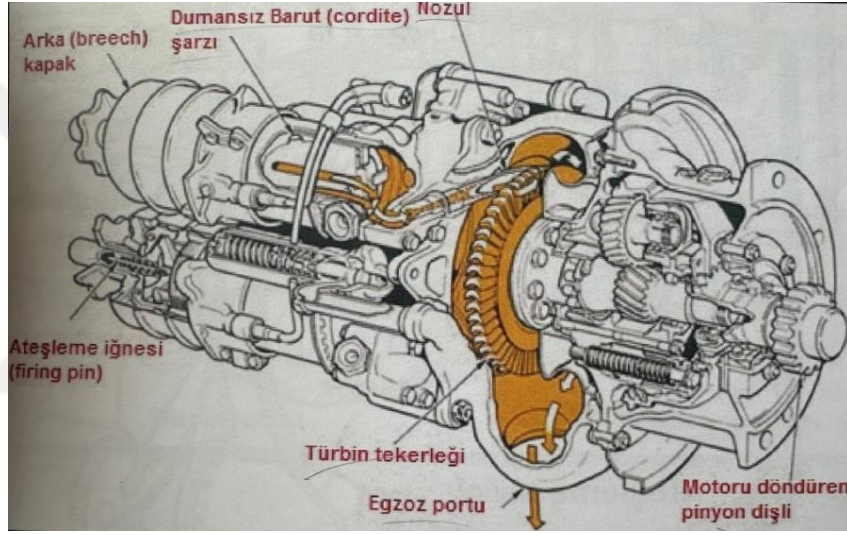
Hidrolik starterler, bazı küçük jet motorlarının çalıştırılması için kullanılır. Çoğu uygulamada, motora monte hidrolik pompalarından biri kullanılır ve bunlar pompa / starter olarak bilinir, ancak bunun dışında değişik bir uygulama olarak ayrı bir hidrolik motor kullanılabilir. Torku motora iletmenin yöntemleri değişebilir, ancak tipik bir sistem bir redüksiyon dişlisi ve kavrama düzeneğinden oluşur. Pompa / starter motorunun döndürme gücü bir yer takat cihazından gelen hidrolik basıncı ile sağlanır ve redüksiyon dişlisi ve kavrama vasıtasıyla motora iletilir. Çalıştırma sistemi, hidrolik valfleri de çalıştıran bir elektrik devresi tarafından kontrol edilir, böylece çalıştırma işleminin tamamlanmasının ardından pompa / starter normal bir hidrolik pompa olarak işlev görür. Hidrolik starter Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. Hidrolik starter (Kurban, 2019a)

e) Kartriçli Starter:

Kartriçli çalıştırma bazen askeri motorlarda kullanılır ve hızlı bir bağımsız start yöntemi sunar. Starter motoru temel olarak yanma kartriçinden çıkan yüksek hızdaki gazlar tarafından yönlendirilen küçük bir impulse-türbindir. Türbinin güç çıkışı, bir redüksiyon dişlisi ve motoru döndürmek için otomatik bir ayırma mekanizması aracılığıyla iletilir. Elektrikle ateşlenen bir patlatıcı kartriçin yanmasını başlatır. “Cordite” (dumansız barut) sarjı, bu tür starterlerin güç kaynağı olmasını sağladığından, gereken sarj büyüklüğü, kartriçli starter motorlarının kullanımını sınırlayabilir. Anlatılan Kartriçli starter Şekil 5.22’de gösterilmiştir.

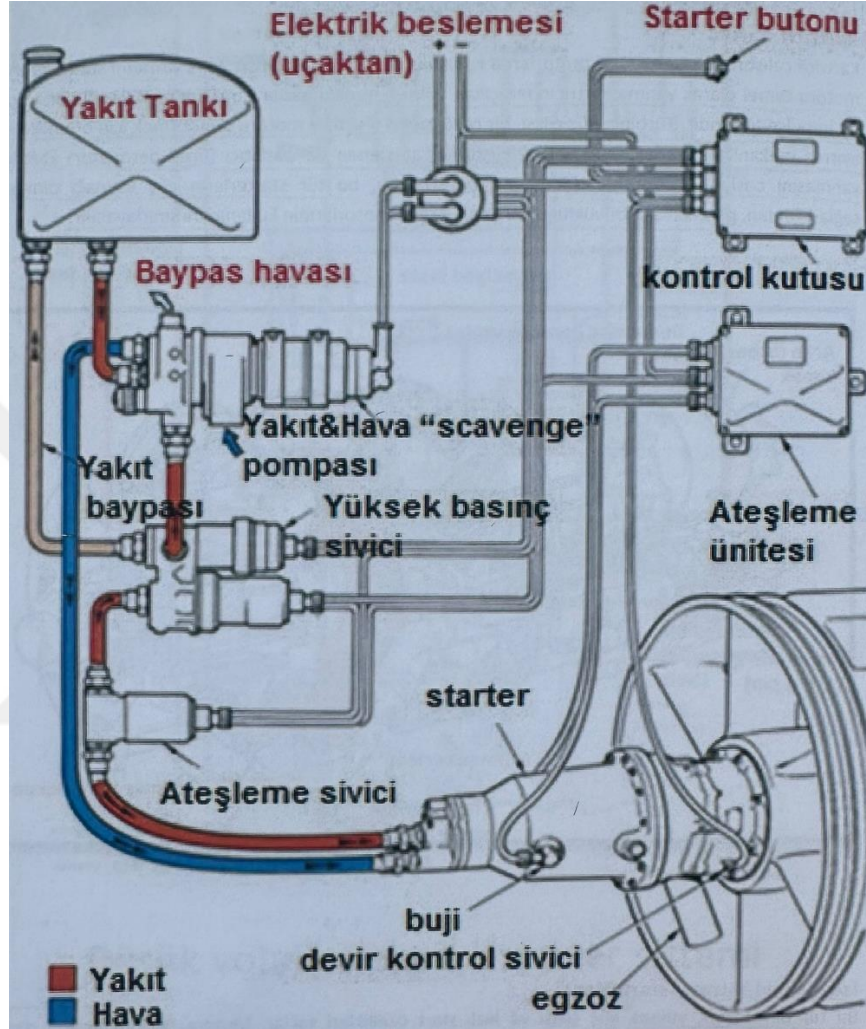


Şekil 5.22. Kartriçli starter (Kurban, 2019a)

f) Iso-propyl-nitrate Starterler:

Bu tür bir starter, yüksek güç çıkışı ve hızlı start özellikleri sağlar. Motor bir redüksiyon dişlisi vasıtasıyla güç aktaran bir türbin vardır. Türbin izopropil nitratin yakılmasından kaynaklanan yüksek basınçlı gazlar tarafından döndürülür. Bu yakıt, yüksek enerji ateşleme sistemi ile elektrikle ateşlenen starter parçasının bir bölümünü oluşturan bir yanma odasına püskürtülür. Bir pompa yakıt deposundan yanma odasına yakıt verir ve hava pompası, her çalıştırmadan önce gazın starter yanma odasını tahliye eder.

Yakıt ve hava pompalarının, ateşleme sistemlerinin ve çevrim iptali işletimi, röleler ve zaman anahtarları tarafından elektriksel olarak kontrol edilir. Iso-propyl-nitrate starter Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Iso-propyl-nitrate starter şeması (Kurban, 2019a)

5.1.2.6. Kapalı devre kamera ve TV sistemi

Bremzeler ilk tasarlanma aşamasında kullanıcının isteğine bağlı olarak farklı şekillerde tasarlanabilir. Genellikle içerisinde dinamometre su sistem altyapısı ve elektrik panolarının olduğu mekanik oda, testi izlemek ve motor komutlarının yönlendirildiği kontrol odası, bir diğer oda ise motor ve yardımcı sistemlerin bulunduğu test odası yani bremze odasıdır.

Tüm bu odaların hem test esnasında hem de test dışı anlarda görüntülenebilmesi önemlidir. Test esnasında motoru farklı açılardan yüksek çözünürlüklü kameralarla izleyebilmek kullanıcıya büyük avantajlar sağlar. Test esnasında motor çalışırken içeriye girmek motor ve insan için de tehlikelidir. Bu sebeple genellikle test esnasında test odasına girmek yasaktır. Bremzede bulunan kameralar, motor üzerindeki oluşabilecek kaçakları gözleyebilmenin yanı sıra, motorun genel çalışmasına da hakim olabilmeyi sağlar. Farklı açılar ve birçok kamera sayesinde hem bremzede bulunan motora hem de yardımcı tüm sistemleri görsel olarak gözlemleyebilirsiniz. Kameraların sayısı ve açısı ne kadar artarsa bremze içi kontrolünüz o seviyede artar. İçeride bulunan kameralar anlık olarak kontrol odasında bulunan televizyonlara aktarılır. Bu sayede test esnasında motor ve yardımcı sistemleri televizyon aracılığıyla test boyunca takip edebilirsiniz.

Genel bremze maliyetinin içerisinde bütçe olarak her ne kadar uygun olacağı düşünülse de yüksek çözünürlükte ve hafıza kaydı alabilme yeteneğine sahip bu cihazlar hatırı sayılır bir maliyete sahiptirler. Bu sebeple maliyet çalışması içerisinde yerlerini almalarında fayda vardır.

5.1.2.7. Acil durum (Emergency) sistemleri

Acil durdurma (EM durdurma) işlevi, normalde bremze kontrol sistemine gömülü alarm izleme sisteminden oldukça ayrı, kablolu bir sistemdir. Ana amacı motor ve diğer yardımcı elemanları test esnasında veya harici zamanlarda olabilecek tehlikelere karşı korumaktır. Genel uygulamada bilgisayarlar yerine insanlar tarafından başlatılan bir kapatma sistemidir, ancak genellikle yangın gibi güvenlik açısından kritik sistemlere acil durdurma elektrik bağlantıları yapılır.

Çoğu acil durdurma sistemi, motor ateşlemesi veya başka bir önemli işlem başlatılmadan önce hepsinin kapatılması gereken seri anahtarlar zinciridir. Yani test öncesi tüm acil durdurma butonlarının çekili olduğundan emin olunur. Acil durdurma butonunun geleneksel işlevi, motorun çalışmasıyla doğrudan ilişkili tüm cihazlardan gelen elektrik gücünü kesmektir. Bu modelde, dinamometreler genellikle 'enerjisiz' duruma getirilir, yakıt besleme sistemleri kapatılarak motora yakıt gitmesi önlenir ve havalandırma fanları kapatılır.

Genellikle bremzelerde üç adet acil durdurma butonu bulunmaktadır:

- Motor ve bremze sistemlerini kapatmak için bir tane
- Rotoru ve dinamometreyi durdurmak için bir tane
- Yangın söndürme sistemini devreye almak için bir tane

Operasyonel ve güvenlik enstrümantasyonu, bu terim motorun ve bremze ekipmanının güvenli bir şekilde çalıştırılması için gerekli olan temel komutları ve kontrolleri kapsar. Kapatma parametreleri kontrol sistemi tarafından izlenir. Operasyonel enstrümantasyon güvenlik sistemleri yazılımla çalıştırılabilir ya da ilgili herhangi bir bilgisayara giden yinelenen sinyallerle sabit kablolu olabilir ve yangın damperleri gibi hücre kapatma prosedürüyle ilişkili cihazları içerir. Aşağıdaki göstergeler bu başlık altında yer alır:

- Motor devri (şaft hattı devri çok yüksek);
- Yağ basıncı (çalıştırma sonrasında basınç çok düşük);
- Tesis soğutma suyu akışı ve basınçlı hava basıncı;
- Yangın söndürme sisteminin mevcut olmasıyla ilgili sinyaller;
- Hücre havalandırması, tahliye sistemi ve yangın damperlerinin durumu;
- Şaft arızalarıyla başa çıkmak için hem motorda hem de dinamometrede aşırı hız alarmları;
- Hücre kapısı ve şaft koruma kilitleri;
- Başlatma sırası ile otomatik olarak tetiklenen hücre içi işaret/alarm

Motor test odası tasarımında ve kullanımında bir dizi önemli faktöre dikkat edilmelidir. Motor test odasında dikkate alınması gereken bazı önemli hususlar:

Güvenlik: Motor test odasının tasarımında ve kullanımında güvenlik en önemli öncelik olmalıdır. Uygun emniyet önlemleri alınmalı ve gerekli acil durum prosedürleri bulunmalıdır.

Ventilasyon ve Hava Temini: Motor test odasının iyi bir havalandırmaya sahip olması, egzoz gazlarını uzaklaştırmak ve temiz hava sağlamak için önemlidir. Yeterli hava sirkülasyonu sağlanmalıdır.

Isı Kontrolü: Motor testi sırasında ortaya çıkan ısıнын kontrol edilmesi önemlidir. Gerekğinde soğutma sistemleri kullanılmalıdır.

Gürültü Kontrolü: Motor testi sırasında oluşan gürültü seviyeleri, çalışanların ve diğer ekipmanın etkilenmemesi için kontrol altında tutulmalıdır.

Titreşim Kontrolü: Motor test odası, motorun üretebileceği titreşimlere dayanacak şekilde tasarlanmalıdır. Titreşim izolasyon sistemleri kullanılabilir.

Elektrik ve Veri Bağlantıları: Motor test odasında yeterli sayıda ve uygun yerlerde elektrik ve veri bağlantı noktaları olmalıdır.

Yangın Güvenliği: Yangın riskini azaltmak için uygun yangın güvenlik önlemleri alınmalıdır. Yangın söndürme sistemleri ve acil durum çıkışları bulunmalıdır.

Görüş ve Işıklandırma: Motor testi sırasında çalışanların rahatça görebilmesi için yeterli aydınlatma ve doğru görüş açıları sağlanmalıdır.

Yerleşim ve Alan: Motor test odası, motorun güvenli bir şekilde yerleştirilebileceği ve test edilebileceği yeterli alana sahip olmalıdır.

Test Ekipmanı ve Kontrolleri: Motor test odasında kullanılacak ekipman ve kontrol sistemleri, test ihtiyaçlarına uygun olarak seçilmeli ve düzenlenmelidir.

Bu faktörler, motor test odası tasarımında ve işletilmesinde göz önünde bulundurulması gereken temel unsurlardır. Her motor ve test ihtiyacı farklı olduğundan, spesifik gereksinimlere uyacak şekilde özelleştirilmiş çözümler geliştirmek önemlidir.

5.1.2.8. Motorlarda standart bakım uygulamaları ve dikkat edilmesi gerekenler

Genel

Söküm-Takım teknikleri ile uygulamaları konusunda bilinmesi gereken bazı temel bilgiler bulunur. Düşük toleranslarla imal edilen motor parçalarının zarar görmesi, ilerleyen zamanda doğrudan motor bütününe etkileyerek daha büyük problemlere yol açabilir. Bu sebeple, motor parçalarının dikkatli taşınması, doğru monte edilmesi ve motor bütününe doğru şekilde taşınması gerekmektedir. Tüm bunları yaparken doğru özel alet ve fikstürler kullanılmalıdır. Bu bölümde motorun bremzeye entegrasyonu ve sökümü sırasında dikkat edilmesi gerekenlerden bahsedilecektir.

Temizlik

- Yabancı maddelerin ana motor veya komponentlerin içine kaçmasını önlemek amacıyla çalışılan alanın oldukça temiz ve tozlardan dahi arındırılmış olması gerekmektedir. FOD (Foreign Object Damage), yabancı madde hasarı dediğimiz riskleri en aza indirmek ve olabildiğince önlemek birinci şartımızdır. Bu sebeple motor çalışma alanına yakın yerlere uygun şartlarda FOD konteyneri koyulması gerekmektedir.

- En ufak parça dahi motora takılmadan önce mutlaka temizlik yönünden kontrol edilmelidir, temizliğinden emin olunmadık bir parça veya bağlantı yapılmamalıdır.

- Sızdırmazlığın maksimum seviyede sağlanabilmesi için, “fitink” ve “kaplin” gibi parçaların birleşim yüzeylerinin öncesinde güzelce temizlenmesi gerekmektedir.

- Motor çevresinde yapılan herhangi bir çalışma sonunda, boşta duran parçalar, takım ve tezgah aletleri, temizlik bezleri, cıvata, somun vb. hiçbir şey orada bırakılmamalıdır.

- İşlenen yüzeylere dokunulması gerektiğinde eller ve eldiven temiz olmalıdır.

- Test anı dışında motor çevresinde keyfiyen görevi olmayan kimse dolaşmamalı ve motor üzeri koruyucu örtülerle kapatılmalıdır.

- Eğer kötü senaryoda motor içerisine herhangi bir yabancı madde, cisim vs. düşürülmesi durumunda tüm montaj, demontaj, entegrasyon işlemleri durdurulmalı ve düşen

parça çıkarılana kadar gerekirse tüm motor bütünü sökülmeli ama asla teste başlanmamalıdır(Kurban, 2019b).

Bakım

- Motorun söküm-takımı sırasında ilgili kitapçıklardan yararlanılmalıdır. Bu kitapçıklar sayesinde hem adımlar atlanmamış olacak hem de işlemlerin doğru sırayla ilerlemesini sağlayacaktır.

- Prosedürlerin tamamı okunmalı ve doğru anlaşıldığından emin olunmalıdır. İşlem sırasında bir uygunsuzluk yaşanarak işlemi durdurmak ve ilgili kitapçığa başvurmak; işlemi bilinçsizce ve emin olmadan devam ettirerek yaşanacak zaman kaybı veya muhtemel hasarlardan daha iyidir. Bu sebeple motor ile ilgili devreye alma işlemleri sırasında veya montaj sırasında olabildiğince dikkatli ve emin olunarak yapılmalıdır. Kesinlikle aceleye getirilmemelidir.

- Motor ve diğer ağır parçalar bremzeye entegre edilirken veya bremzeden sökümü aşamasında kesinlikle kalite kontrollü ve uygun aparatlar aracılığıyla kaldırılmalıdır. Böylece hem personelin yaralanması hem de motorun zarar görmesini engellenebilir.

- Söküm-takım, entegrasyon sırasında yalnızca el kitabında tanımlanmış uygun ve doğru özel el takımları kullanılmalıdır. Bu takımlar kullanılmadığı esnada ilgili takım arabalarında/tezgahlarında muhafaza edilmelidir.

- Motorun herhangi bir noktasına entegrasyonu esnasında metal çekiç ve zımbaların piriñ olanlarıyla vurarak zorlanmamalıdır. Eğer vurarak zorlanması gerekiyorsa, plastik tokmak veya plastik naylon, deri yüzeyli çekiç gibi malzemeler kullanılmalıdır.

- Motor söküm takım aşamasında üzerinde çalışılan operasyon sona ermeden bir diğer operasyona geçilmemelidir. Kitapçık aksini söylemediği sürece; motor askıda veya bağlayıcıları sıkılmadan, torklanmadan, emniyetleme yapılmadan gevşek şekilde bırakılmamalıdır.

- Motor montajdan veya herhangi bir yerden bremzeye test için geldiğinde, ilgili bremze-motor arası bağlantıları yapılana kadar motor üzerindeki koruyucu tapa, kapak ve örtü kaldırılmamalıdır.

- Bremze-motor bağlantıları yapılırken varsa hizalama işaretleri dikkate alınmalı ve bu işaretlere göre eşleştirilmelidir.

- Bremze-motor arasında yapılan bağlantılar sonrası, aksesuar parçalarının, boru ve hortumlarının sökümü takımı esnasında hatlarda yağ, yakıt gibi sıvılar kalabilmektedir. Bu sıvılar uygun bir kovaya veya güvenli boşaltma bölgesine boşaltılmalıdır. Sonrasında ise motor üzerinde açık kalan bağlantı portu kesinlikle uygun kapak, koruyucu tapa vb. ürünle kapatılmalıdır.

- Yağ ve yakıt hat portları yapışkanlı bantla kapatılmamalıdır çünkü bantların üzerindeki yapışkan maddeler yağ veya yakıtın temasıyla çözünerek test esnasında sistemi kirlitebilir.

- Bremze motor işlemleri esnasında teknisyenin yağ veya yakıtla teması sonrasında ellerini yıkamalı ve olabildiğince her an yeni eldivenle çalışmalıdır.

- İlgili kitapçıkta aksi belirtilmediği sürece tüm dişli ve “spline” diş ve kanalları takılmadan önce yağlanmalıdır.

- Motor bremzeye geldiği esnada motor sehpasından indirilmeden hemen önce görsel kontroller yapılmalı eğer bir uygunsuzluk tespit edilirse raporlanarak not düşülmeli ve ilgili birimlere bildirilmesi gerekir.

- Motor test sehpasına alındığında ilgili ara bağlantılar yapıldığı esnada motor üzerindeki harici motor boruları üzerine basılmamalı, elle asılmamalıdır. Üst bölgedeki işlemler merdiven, çalışma sehpası gibi yardımcı platformlarla yapılmalıdır. Bu işlem aynı zamanda hizalaması yapılan motorun hizalanmasının bozulmaması için de son derece önem arz etmektedir.

- Motor üzerinde veya bağlantıları esnasında çalışırken, çalıştığımız ekipman, alet, takılacak veya sökülen parçaları motor üzerine koyarak motoru raf gibi kullanmamalıyız. Motor üzerinde veya yakınında unutulabilen bu parçalar FOD riski oluşturmakta ve motora test esnasında büyük zararlar verebilmektedir(Kurban, 2019b).

Motorun bremzeye montajı/entegrasyonu

- Motor montaj sehpasından test sehpasına alınmadan önce kalite kontrolü yapılmış olmalı ve uygun taşıma aparatına doğru şekilde bağlanmalıdır.

- Taşıma aparatına bağlanan motor vinç tarafından taşıma aparatının kablo bağlantı boşluğu bir miktar alınarak, sehpadan o şekilde sökülmelidir.

- Daha sonra tam yük şeklinde taşıma aparatı aracılığıyla vinçe yüklenen motor test sehпасına taşındığı esnada bir yere çarpmasını engellemek amacıyla teknisyen kontrolü ile ilgili kısma taşınmalıdır.
- Test sehпасına taşınan motor tamamıyla sehпaya bağlanmadan ve cıvata ayak bağlantıları yapılmadan yani motor bağlantısı garantiye alınmadan taşıma aparatı sökülmemelidir.
- Motorun sehпaya bağlantısı esnasında eğer ki kilitleme pulu, yaylı pul, o-ring veya conta gibi bağlantılar kullanılması gerekiyorsa her seferinde yenisinin kullanılması gerekir. Çünkü bu bağlantılar zamanla çok da belli etmeyerek kopuk, yarık şeklinde zarar görmüş olabilirler.
- Özelliğini kaybeden bağlantı elemanlarını, emniyet somunlarını kullanmak tekrar sıkıya çalışmak veya uç kısımlarını penseyle sıkarak sıkıştırmaya çalışmak gibi yöntemler kesinlikle sağlıklı değildir, riske atılmamalıdır.
- Motorun bremzede test sehпасına veya motor üzerindeki aksesuarlar için yapılan bağlantılarda dişleri hasar görmüş cıvata, vida, somun, hidrolik hortum gibi elemanlar kullanılmamalıdır. Kullanım öncesinde bremze altyapısından bağlanan tüm elemanlar kontrol edilerek bağlanmalıdır.
- Saplama veya vida takılacak kör kılavuz kanalları/delikleri entegrasyon öncesinde kontrol edilmeli eğer varsa içerisine dolan yabancı maddeler çıkarılmalıdır.
- Motorun bremze ile olan tüm arayüz bağlantılarının cıvata ve vida gibi tüm bağlayıcılarının sıkılıp torklanacağı değerler ilgili el kitaplarına uygun şekilde yapılmalıdır. Takılacak parça aynı yüzey üzerinde grup halinde ise karşılıklı veya çaprazlama bir sıra izlenerek final torku verilmeden önce, tutturulup sıkılmalıdır.
- Burkulma ve bükülmeye karşı dayanıklı hale getirilmemiş bağlantı parçalarının torklanması esnasında ikinci bir anahtarla desteklenmesi gerekir. Ayrıca gerekirse karşı destek sağlayacak şekilde aksi yönde kuvvet uygulanmalıdır.
- Birbirine sıkı geçmeyle bağlı veya sıkı geçme yapılacak malzemelerin zarar görmesini önlemek amacıyla mekanik baskılama aletinin baskı ucuyla parça arasında veya baskı görebilecek diğer yüzeylerinde aracı olarak fiber veya plastik bloklar kullanılmalıdır.
- Boru bağlantıları esnasında; özellikle dış çekilmiş alanların temizliğine özellikle kontrol edilmelidir. Takılacak boruların genel durumunun iyi olup olmadığı veya taşıma esnasında hasar görüp görmediği tam anlamıyla emin olunana kadar kontrol edilmelidir.

- Bazı özel bölgelerde parçaların söküm ve takımı için ısıtılma soğutulma işlemi gerekebilir. Bu işlemler ilgili el kitapçığına uygun şekilde yapılmalıdır.
- Parça ısıtma işlemi sırasında eldiven ve kişisel koruyucu ekipmanları kesinlikle kullanılmalıdır. Isıtılan parça birleştirilecekse parça soğumadan hızlıca birleştirme işlemi gerçekleştirilmelidir. Aksine bir metot belirtilmediği sürece, dış çap parçalarının sıcaklığını 121°C sıcaklığa çıkarmak için bazı metotlar kullanılır;
 - Parçayı bir fırına koyarak sıcaklığın kademeli olarak istenen doğru sıcaklığa yükseltilmesi veya
 - Parçayı bir ısıtma battaniyesine sararak parçanın istenen doğru sıcaklığa yükseltilmesi veya
 - Isının parça üzerinde istenen sıcaklığı, kademeli olarak ve eşit şekilde yayılarak ulaşmasını sensör kullanarak takip etmek koşuluyla ısı tabancası ve İSG (iş güvenliği ve sağlığı) uygun olduğu şartlarla pürmüz kullanarak parça ısıtılabilir.
- Sıcak ve soğuk parçaları arasındaki ısı transferini azaltmak için, işlemlerin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- Parça soğutulurken yine kişisel koruyucular ve eldiven kullanılmalıdır. Soğutulan parça hızlı bir şekilde yerinden çıkarılmalıdır.
- İç çaptaki parçaları soğutmak için kuru buz kullanılmalıdır. Kuru buza veya temas ettiği yüzeye kesinlikle çıplak elle dokunulmamalıdır (Kurban, 2019b).

Kaçakların giderilmesi

- Motor ile bremze altyapısından bağlanan özellikle hidrolik hortumlarla motor üzerindeki portlar arasında oluşabilecek kaçak görülen bağlantılar birbirinden ayrılmalıdır.
- Üzerindeki mevcut conta, “gasket”, “O-ring” gibi sızdırmazlık elemanları çıkarılmalı ve yenisiyle değiştirilmelidir.
- Bağlantıların birleşme yüzeyleri kirlenme, çizik, ezik veya diğer yüzey kusurları açısından incelenmelidir.
- Dişli bağlantı elemanlarında diş hasarı olup olmadığı kontrol edilmeli, bağlantı elemanlarının belirtilen değere sıkılarak torklandığından ve uygun şekilde yerine oturduğundan emin olunmalıdır.

- Sık yapılan hatalardan biri ise, bağlantıları tork değerinin üzerinde bir değerle daha kuvvetli olsun amacıyla sıkarak, mevcut kaçak veya sızıntıların önüne geçmeye çalışmaktır. Bu durum bağlantı elemanlarında hasara sebep olabilmektedir.

Borular

Motor bremzede test edilirken birçok boru bağlantısına ihtiyaç duymaktadır. Yağ, yakıt, hava gibi sistemler motora boru bağlantıları ile bağlı olabileceğinden dolayı boru bağlantılarından ayrıca bahsetmekte fayda var.

- Borular monte edilirken, tüm uç bağlantı parçaları ve kelepçeler el torkuyla sıkılarak tutturulmalıdır. Tüm bağlantılar yerine tutturulduğunda, önce kelepçeler sıkılıp torklanmalı, sonra bağlantı uçları sıkılıp torklanmalıdır.
- Boru ve bitişiğindeki parçalar arasında ilgili dökümünde belirtilen miktarda bir boşluk bırakılmalı ve bu klerans boşluğu korunmalıdır.
- Kaplin somunların dişleri elle tutturulduktan sonra, takılmadan ilerlemesi gerekir.
- Bağlantı bölgesi ile kaynaklı alanlar asla bükülmemelidir.
- Borunun orijinal kıvrımının yönünde bükülme yapılmasında sakınca yoktur, ancak ters yöne eğmeye müsaade etmez.
- Mümkün olduğu kadar boru mevcut düz bölümlerinden bükülmelidir.
- Çapı bir inç (25.4 mm) veya daha fazla olan borular için üzerinde çökme olmasın diye, bükücü aletler kullanılmalıdır.
- Boru ile karşı bağlantı arasındaki eşleşik yüzeyler birbirini tam olarak karşılamalı ve kusursuz şekilde oturduğundan emin olunmalıdır. Aksi taktirde kaçaklara ve sızıntılara yol açabilir.
- Borulara yeniden işleme “rework” yapılması gerekirse, bükülme yarıçapı, boru çapının iki katından az olmamalıdır ve bükülme açısı 3 dereceden fazla değiştirilmemelidir. İşlem sonrası kıvrılma ve kırışıklık gibi kusurlar kabul edilemez.
- Sızdırmazlığın gerekli olduğu kaplin bağlantılarında, sızdırmazlık malzemesi sürüldükten sonra montaj yapılmadan minimum 10 dakika kuruması için beklenmelidir. Eğer borunun içine sızdırmazlık malzemesinden bulaşırsa ıslak bezle silinmelidir. Kullanılan sızdırmazlık malzemesinin özellikle hava borularında kaçmaması gerekir.

Hortumlar

- Boruların iç yapısındaki teflon astarların zarar görmesi nedeniyle, özellikle de parçalar soğuk olduğunda hiçbir hortum eğilip bükülmemelidir. Kıvrılmış hortumlar kullanılmamalıdır. Montaj sırasında hortumun bükülmediğinden veya gerilmediğinden emin olunmalı ve bağlantılara asla aşırı torklama yapılmamalıdır. Hortumlar söküldükten sonra açık uçlar kapatılmalı ama kapatırken yapışkan bantlar kullanılmamalıdır.

- Akışkan rakorları, istenen tork değerine kademeli olarak yavaş yavaş sıkılarak getirilmeli, sonrasında 0.25 tur geri gevşetilerek tekrar sıkılmalıdır. Bağlantı üzerinde bir kaçak veya sızıntı görüldüğünde, aşırı torklama yaparak düzeltmeye çalışılmamalıdır. Hortumlar, borular veya bağlantı parçaları üzerindeki rakor bağlantı somunlarını sıkarken her zaman iki anahtar kullanmakta fayda vardır. Sabit kısım bir anahtarla tutulurken, diğer anahtarla tork uygulanmalıdır. Sıkma işleminden önce hortumun bağlantı somunu ile baş bileziğinin arasına yağlama yağı kullanılmalıdır.

- Orijinalinde form verilerek şekillendirilmiş hortumlar ile büyük çaplı hortumlar eğilip bükülmemeli veya düz bir form verilmeye çalışılmamalıdır. Hortumlar çıkarıldığında, açık uçları kapatılmalı, ancak yapışkan bantlar kullanılmamalıdır.

- Orijinalinde form verilerek şekillendirilmiş hortumları monte etmeden önce, teflon astarın hasar görmediğinden emin olmak için hortumun içi görsel olarak kontrol edilmeli, hasar görmüş ise hortum değiştirilmelidir.

- Hortumlar kullanılmadığı anlarda temiz ve korunaklı bir yerde muhafaza edilmeli, ağızları uygun bez ve türevleriyle kapatılmalıdır (Kurban, 2019b).

5.1.2.9. Kontrol ve haberleşme sistemi

Büyüyen ve gelişen endüstriyle birlikte, makine ve cihazlar arası iletişim de önem kazanmakta ve zorlaşmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek adına endüstri haberleşme konusunda protokoller şeklinde belirli bir standart oluşturarak çözüm oluşturmaya çalışmıştır.

Sistemler arası toplanan veriler, bu verilerin işlenmesi ve analiz edilmesi, otomasyon sistemlerinin PLC ve bilgisayar yardımıyla haberleşmesi sonucu olur. Haberleşirken sistemler arası yani alıcı ve verici sistem arasındaki iletişimin hızlı olması kadar güvenli ve

zamanında da olması gerekmektedir. Tüm bu gereklilikler farklı haberleşme protokollerinin doğmasına sebep olmuştur. Yani kullanıcının önceliklerine göre farklı haberleşme protokolleri tercih edilebilir. Her protokolün kendine özgü kuralları vardır. Cihazların da bu protokollere uygun şekilde imal edilmesi gerekmektedir (Şirin, 2015).

Endüstriyel protokoller, endüstriyel bir ağın parçası olarak makineler, cihazlar ve sistemler arasında bağlantı sağlayan haberleşme protokolleridir. Haberleşme protokolleri, bağlı PLC'ler, makine kontrolleri, HMI'lar, sensörler ve sistemlerle operatörün saha ile arasındaki görünürlüğü sağlarken kontrol de etmesini mümkün kılar.

Veri iletişimi, bilgi veya verinin, çoğunlukla dijital formatta bir vericiden alıcıya, bu ikisini bağlayan bir bağlantı (bakır tel, koaksiyel kablo, optik fiber veya başka herhangi bir ortam olabilir) yoluyla dönüşümünü ifade eder. Geleneksel iletişim ağları, bilgisayarlar, bilgisayarlar ve çevre birimleri ve diğer cihazlar arasında veri iletişimini sağlamak için kullanılır. Ayrıca, endüstriyel haberleşme protokolleri, fabrika gibi üretimin ve kontrolün zorlu olduğu ortamlarda büyük kurulumlarda gerçek zamanlı kontrol ve veri bütünlüğünü ele almak için yapılmış özel bir ağ türüdür.

Test odalarında da aynı yukarıda anlatılan mantık doğrultusunda birbirleriyle haberleşmesi gereken ve hatta HMI (Human Machine Interface) arayüzü ile operatörü sisteme dahil eden bir yapı kurulur. Bremselerde birbiri ile haberleşmesi gereken birçok sensör, cihaz bulunmaktadır. Test esnasında odaya tek müdahiliniz bu yapılar tarafından gerçekleşeceğinden bu haberleşme protokolünün ve altyapısının oldukça sağlam olması gerekmektedir. Motor üzerinden anlık alınan veriler ve bu verilere bağlı sizin verdiğiniz aksiyonlar test ile doğrudan ilişkilidir. Burada size gelen bilginin hızı, güvenilirliği ve doğruluğu önemlidir. Örnek vermek gerekirse; teste başlarken motora göndermeniz gereken bir yakıt miktarı vardır. Siz motoru başlatırken test odasında güvenlik amacıyla kapılar kapalı ve kontrol odasında olacaksınız. Motora yakıtı gönderdiğiniz hattaki vanaları veya bu vanaların açıklığını kontrol odasında bulunan HMI arayüzünden PLC üzerinden yapabilirsiniz. Aynı şekilde motora giden yakıt miktarını da, motor size yine bir haberleşme protokolü ile iletir ve siz bu sayede kontrol edebilirsiniz.

Haberleşme

Markalara özel haberleşme protokolleri bulunmaktadır. Ayrıca bu protokoller 3 ana başlıkta incelenebilir.

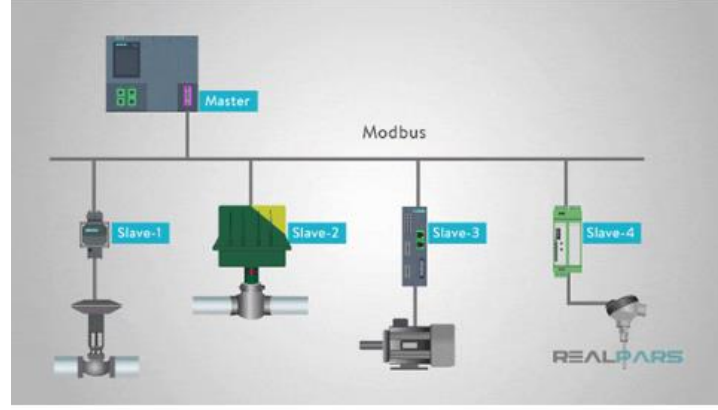
- Seri Haberleşme Şekline Göre
- Ethernet Haberleşme Şekline Göre
- Paralel Haberleşme Şekline göre

Kendi aralarında avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Ethernet ve seri haberleşme şekillerinin ikisi de son derece hızlı ve oldukça fazla haberleşme yöntemleri olmasıyla birlikte, Ethernet tipi haberleşme şekli seri haberleşme yöntemine göre biraz daha hızlıdır. Paralel haberleşme şekli ise daha çok eskiden kullanılan ve günümüzde çok tercih edilmeyen bir haberleşme yöntemidir.

En çok kullanılan haberleşme protokoller arasında; Fieldbus, Modbus, Uart, Profibus, As-i, Canbus, Rs, Devicenet, Controlnet, Hart, Ethernet, Profinet, CANopen, OPC ve benzeri yer alır. Bunlardan özellikle Modbus, CANbus, CANopen, Profibus, Profinet ve OPC gibi havacılık sektöründe kullanımı daha fazla yer almaktadır. Bu protokolleri birer dil olarak düşünebiliriz. Her biri aynı mesajı işletebilir fakat işletme şekilleri ve kuralları birbirlerinden farklıdır.

1) Modbus

Modbus, 1970'lerin sonlarına dayanan ve geniş bir seri iletişim protokolü olan bir standarttır. Bu protokol, bir cihazın efendi (master) olarak hareket ettiği ve bir veya daha fazla köle (slave) cihazla iletişim kurduğu bir master-slave iletişim protokolüdür. Modbus, genellikle endüstriyel otomasyon sistemlerinde kullanılır ve programlanabilir mantık denetleyicileri (PLC'ler), sensörler ve insan-makine arayüzleri (HMI'ler) gibi birçok cihaz tarafından desteklenir. Örnek olarak Modbus, bir sistemdeki cihazların aynı ağa bağlı sıcaklık ve basınç ölçer gibi cihazlarının sonuçlarını bir denetleyici bilgisayara veya PLC'ye iletmesini sağlar.

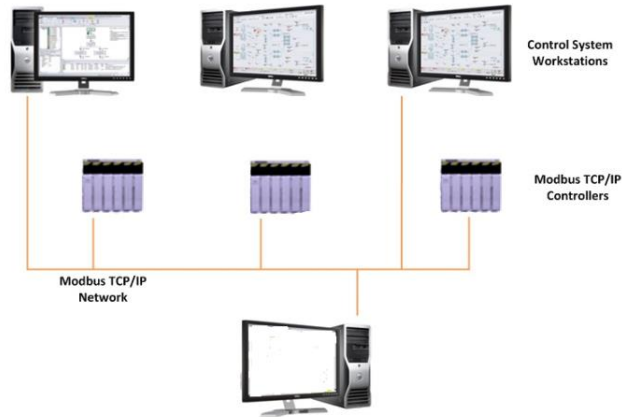


Şekil 5.24. Modbus master/slave yapısı (Anonim, 2020)

En yaygın kullanılan ve neredeyse tüm cihazların desteklediği bir haberleşme protokolüdür. Hem seri haberleşme şekline hem de ethernet ile haberleşme şekline uyum sağlamaktadır. Modbus RTU seri haberleşme sağlarken, Modbus TCP ethernet ile haberleşme sağlamaktadır. Burada test sistemlerinde bulunan enstrümantasyonların destekleme şekline göre her ikiside tercih edilebilir. Modbus TCP kullanılırken desteklemediği enstrümantasyonlar için Modbus RTU ile haberleşme sağlamak mümkündür. Modbus yapısı master/slave yapısı Şekil 5.24’de temsilen gösterilmiştir

- **Modbus RTU:** Modbus RTU protokolü yukarıda da bahsettiğimiz gibi master/slave mimarisine göre düzenlenmiş seri haberleşme protokollerini kullanır. Kullanım kolaylığı ve güvenilirlik nedeniyle yaygın olarak kullanılır. İki bitlik veriler halinde yollanan mesajların güvenli iletimi için kullanılan 16 bitlik CRC (hata kontrol mekanizması) ile basitlik ve güvenilirlik sağlanmış olur. Çoğunlukla RS485 haberleşme protokolü kullanılır. Motorların koruma sistemleri için ekonomik bir çözümdür (Aydınöğlu, 2016).

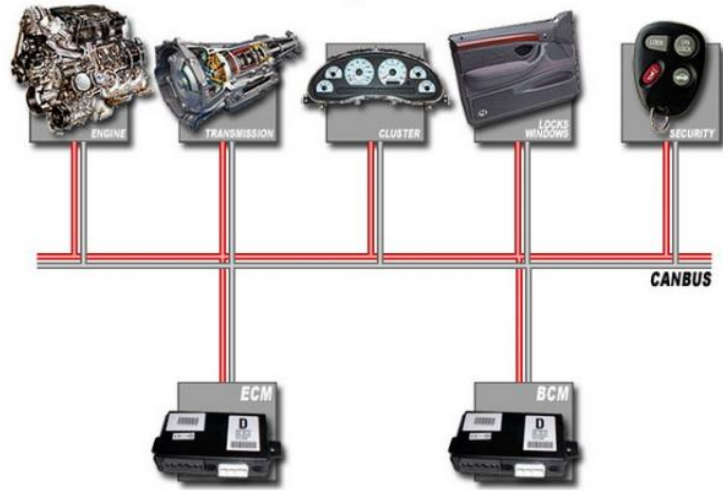
- **Modbus TCP/IP protokolü:** Otomasyon cihazlarının denetim ve kontrol amaçları için tasarlanan, kullanımı basit bir protokoldür. Bu protokol, klasik internet ağ yapısıyla haberleşmeyi sağlayarak 100 Mbps hızında veri aktarımını destekler. TCP/IP protokolü kullanıldığında çok sayıda bağlantı kurulabilir. Sunucu ve istemci cihazlar arasında bağlantılar oluşturularak veri aktarımı gerçekleşir. Sistemde herhangi bir cihaz istemci veya sunucu rolünü üstlenebilir, ayrıca birden fazla sunucu veya istemci içerebilir. İletim hızı, cihazlarda kullanılan işlemci ve internet kartı türüne bağlı olarak değişebilir (Anonim, 2020). Modbus TCP/IP Protokol Şeması Şekil 5.25’te gösterilmiştir.



Şekil 5.25. Modbus TCP/IP protokol şeması (Aydınöğlu, 2016)

2) CANBus / CANopen

- **CANBus:** CANBus (Controller Area Network Bus/Kontrol Alan Ağı Veriyolu) protokolü, Robert Bosch tarafından geliştirilen, birden fazla kablo kullanmak yerine tek bir kablo ile veri transferi yapabilmeyi hedeflemiş bir protokoldür. CANBus, endüstriyel otomasyon alanlarında kullanıldığı kadar özellikle otomotiv sektöründe de sıkça tercih edilen bir haberleşme protokolüdür. Canbus haberleşme protokolünün otomotivdeki kullanımına yönelik ağ yapısı Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Farklı cihazların aynı veri yolu üzerinden iletişim kurmasını sağlar. Bu özelliği de tercih edilmesinin bir nedenidir. Yapılan istatistiksel çalışmalarda, 100 yılda 1 tane mesaj hatası tespiti yapılmış ve bu yönüyle de yüksek güvenilirliğe sahip olduğunu kanıtlamıştır. Aynı zamanda bu protokolde tüm üniteler, hattına veri yollamada eşit önceliğe sahiptir. Buna “multimaster” denir. Bu durum sonucu üniteler bir anda veri yollamaya çalışırsa çatışmalar yaşanabilir. Bu olası durumu engellemek için sistem bütün üniteleri eş zamanlı olarak izler ve hangi hat boş ise o anı yakalamaya çalışır. Hattı boş gördüğü an da ünite verisini gönderir. CANBus seri haberleşme yöntemi ile haberleşmektedir (Aydınöğlu, 2016).



Şekil 5.26. CANBus protokolünün otomotivde kullanımı (Şirin, 2015)

- CANopen: Hızlı haberleşme, basit bağlantı yapısı, stabil ve güvenilir haberleşmenin yanı sıra ucuz maliyeti gibi özellikleriyle havacılık, otomotiv ve endüstriyel otomasyon alanlarında tercih edilmektedir. CAN port, CANopen'ın PLC tarafından tasarlanan ve master ya da slave modda kullanılabilen DS301'in basit haberleşme protokollerini kullanır. CANopen Controller Area Network tabanlı bir protokol olup farklı cihazlar arası olan haberleşmeyi sağlayabilmektedir ve genellikle bu yönde kullanılırlar.

3) Profinet / Profibus

- Profinet: Profinet, Ethernet tabanlı bir haberleşme protokolüdür ve endüstriyel otomasyon sistemlerinde yüksek hızlı ve güvenilir veri iletimini destekler. Gerçek zamanlı haberleşme yeteneği sayesinde proses otomasyonu uygulamalarında yaygın olarak tercih edilir. Profinet, hem kablosuz hem de kablolu ağlar arasında iletişim kurabilir ve hem Modbus TCP/IP hem de UDP/IP tabanlı haberleşme modlarını destekler.

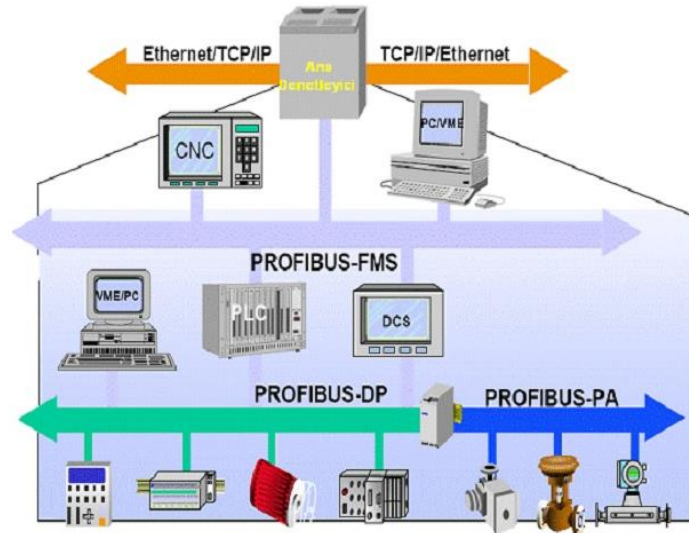
Bazı markalar cihazlarının haberleşmesi için haberleşme protokolleri geliştirmektedirler. Siemens kendi cihazları için profineti geliştirmiştir fakat diğer cihazlarla da haberleşebildiği unutulmamalıdır. Ayrıca endüstride profinet profibus'ın geliştirilmiş hali olarak da görülmektedir.

- Profibus: Profibus, endüstriyel otomasyon sistemlerinde tercih edilen ve özellikle saha seviyesindeki cihazların iletişimini sağlamak için kullanılan bir protokoldür. Veri iletimi güvenilir ve yüksek hızlıdır (Fauci, 1997). Profibus, kullanım alanına ve tipine göre, 3 farklı haberleşme protokolleri (DP-PA-FMS) sunar.

Profibus DP (DP-Decentralized Periphery/Dağıtılmış Çevre): Fiziksel yapı olarak RS485 veya fiber optik alt yapısını kullanan Profibus DP, en çok kullanılan haberleşme tipidir. Hız, etkinlik ve düşük bağlantı maliyeti özellikleri sebebiyle tercih edilir. Merkezi dağıtılmış cihazlarla ve akıllı saha cihazları ile haberleşme sağlanabilir

Profibus FMS (FMS-Fieldbus MessageSpecification/Saha Veri Yolu Mesaj Tanımlaması): Genel bir haberleşme tipi olan FMS, DP gibi fiziksel haberleşme yapısı olarak RS485 ve fiber optik alt yapısını kullanır. Akıllı kontrol aygıtlar arasındaki haberleşme için gelişmiş uygulama fonksiyonlarını sunar. TCP/IP' nin gelişiminin ve kullanımının hızla artması FMS'yi olumsuz etkilemektedir.

Profibus-PA (PA-Process Automation/Süreç Otomasyonu): DP ile aynı master üzerinde çalışan PA, genellikle proses otomasyonunda kullanılır (Aydınoglu, 2016). Profibus Protokollerini içeren ağ yapısı Şekil 5.27'de gösterilmiştir.



Şekil 5.27. Profibus protokolleri (Şirin, 2015)

4) OPC (Ole for Process Control)

OPC, farklı tedarikçilere ait cihazların ve kontrol sistemlerinin birbirleriyle iletişimini sağlayan bir standardın adıdır. OPC UA (Unified Architecture) daha güvenli ve kapsamlı bir sürüm olarak kullanılır. Örneğin, test odalarının ana bina ile iletişimi gibi durumlarda tercih edilebilir. Yani alt ana sistemlerin bina altyapısı ile olan haberleşme protokolleri için uygundur.

Kontrol

Endüstriyel otomasyon alanında kullanılan üç önemli kontrol mekanizması,

- Programlanabilir Mantık Denetleyicileri (PLC'ler)
- Dağıtılmış Kontrol Sistemini (DCS)
- Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) içerir.

Tüm bu kontrol mekanizması sahada haberleşilen enstrümanlar, denetleyici kontrol mekanizması olan bilgisayarlar, dağıtılmış I/O kontrolörleri ve HMI arayüzünden oluşmaktadır. Tüm bu cihazların kendi aralarında bir ara bağlantı ayrıca da aralarındaki komplike iletişimi sağlamak için daha güçlü ve donanımlı bir iletişim ağına ihtiyaç duyar. Geleneksel haberleşme yöntemlerine göre daha karmaşıktır. Endüstriyel haberleşme protokolleri sahada bulunan cihazlar, kontrolörler ve bilgisayarlar arasında bir iletişim ağı oluşturur.

Verileri ve kontrol sinyallerini iletmek için kablolu veya kablosuz iletim şekilleri olabilir. Kablolu iletim durumunda farklı (koaksiyone, bükülü çift, fiber optik vb.) tipte kablolar kullanılabilir. Her ağ kablosunun, birbirine göre avantaj ve dezavantaj sağlayabileceği durumlar vardır. Bu sebeple kablo seçimi de önemlidir.

Haberleşme protokolleri kısmında açıkladığımız gibi, test odasındaki cihazlar, kendi içerisinde, kontrol odasıyla ve ana bina sistemiyle iletişim kurması gereken çeşitli altyapılara sahiptir. Bu ağ sistemi hem cihazların uygunluğu doğrultusunda hem de sistemin en doğru ve hızlı yapısıyla çalıştırılmak zorundadır. Olası hatalar, motor testini doğrudan riske

sokabilir ve bu durumu etkileyebilir. Daha önce dil benzetmesi yaptığımız haberleşme protokolleri, bu kontrol mekanizmaları sayesinde birbirlerine aktarılabilir.

1) PLC (Programmable Logic Controller) Sistemi

Endüstriyel otomasyonun temel taşlarından biri olan Programlanabilir Mantık Denetleyicileri (PLC), akıllı fabrika ve üretim tesislerinin kontrolünde kritik bir rol oynar. Programlanabilir Mantık Denetleyicileri (PLC), endüstriyel süreçlerin otomasyonunu sağlamak için kullanılan özel bir elektronik cihazdır. PLC, fabrikalardaki üretim bölümlerinde veya makinelerin kontrolü gibi işlemlerin denetimlerinde kullanılan otomasyon cihazıdır. PLC'ler, dijital ve analog girişleri alarak programlanabilir bir mantık ile işleyip çıktıları kontrol eder. İşledikleri bu çıktıları HMI arayüzü ile kullanıcıya en doğru ve sade şekilde aktararak kontrol kolaylığı sağlarlar. Bu sayede karmaşık üretim süreçleri otomatik olarak saha dışından da yönetilebilir.

PLC'ler, tipik olarak bir merkezi kontrol ünitesi ve giriş/çıkış modüllerinden meydana gelir. Sensörler ve diğer saha cihazlarından alınan veriler, merkezi üniteye iletilir. Buradaki program, bu verilere bağlı olarak çıkışları kontrol eder. PLC'lerin esnek programlanabilirliği, çeşitli senaryolar ve koşullar için programların kolayca oluşturulabilmesine olanak tanır.

Endüstriyel otomasyon alanında en çok kullanılan PLC çeşitleri;

- Regin EXOcompact serisi {XCA283DW-4}
- Siemens Simatic S7 serisi
- Allen-Bradley ControlLogix serisi
- Schneider Electric Modicon serisi
- Mitsubishi MELSEC serisi
- ABB AC500 serisi
- Omron CJ1/CJ2 serisi
- GE Fanuc VersaMax serisi
- Delta DVP serisi
- Yokogawa STARDOM serisi

PLC'lerin önemi; PLC'ler, endüstriyel otomasyon sistemlerinin merkezinde yer alır. Birçok avantajları vardır:

Esneklik: PLC'ler, ihtiyaçlara göre farklı çalışma alanlarına programlanabilir. Bu, kullanılacağı alanda oluşabilecek değişikliklere uyum sağlamasını mümkün kılar. Bu sayede revizyonları gerçekleştirme esnekliğini yanında getirir.

Hızlı Reaksiyon: sahada bulunan enstrümantasyon ve saha bağlantılarıyla hızlı ve hassas tepkiler verir. Bu da kullanıcıya daha az hata ile geri dönüş yapma ve kontrol kolaylığı sağlamaktadır. Bu sayede oluşabilecek hataları da minimize ederler.

Merkezi Kontrol: Farklı cihazlar ve ekipmanlar arasındaki iletişimi sağlayarak kontrol odası gibi merkezlerden kontrol edilmesini mümkün kılar.

Veri Toplama ve İzleme: PLC'ler, sahada bulunan sensörlerden gelen verilerin toplanarak onların izlenmesini sağlar. Bu da verilerin analiz edilerek geri dönüş sağlanmasını (feedback) ve iyileştirilmesini sağlar (Fauci, 1997).

2) DCS (Dağıtılmış Kontrol Sistemleri)

Endüstriyel otomasyonda diğer bir temel kontrol sistemi Dağıtılmış Kontrol Sistemleri (DCS), PLC'ye benzer şekilde saha ile kullanıcı arasındaki oluşabilecek karışıklığın yönetilmesine ve optimum seviyeye getirilmesini sağlar. DCS, endüstriyel süreçlerin izlenmesi, kontrol edilmesi ve yönetilmesi için kullanılan bir otomasyon sistemidir. Bu sistemler PLC'ye göre daha geniş ağ yapıların haberleşmesi ve kontrol edilmesinde kullanılarak karmaşık olan sürecin basite indirgenmesini sağlar.

DCS sistemi, sahada bulunan cihazlardan aldığı bilgileri, verileri toplayarak ana kontrol odasına iletir. Ana kontrol odasında bulunan operatör, gelen bu veriler sayesinde hem onları izleyebilir hem de gerek duyduğunda müdahalesi mümkündür. DCS'nin bu esnek programlanabilirliği ile farklı senaryolar ve koşullar için programlar oluşturulabilir.

Endüstriyel otomasyon alanında en çok kullanılan DCS çeşitleri;

- ABB 800xA
- Emerson DeltaV
- Siemens PCS 7
- Honeywell Experion PKS
- Yokogawa CENTUM VP
- Schneider Electric EcoStruxure Foxboro DCS
- Rockwell PlantPAx
- Invensys (Schneider Electric) Triconex
- GE Digital Mark VIe
- AspenTech aspenONE Process Explorer

DCS sistemleri, endüstriyel otomasyon için oldukça önemlidir. Avantajları şu şekildedir:

Karmaşıklık Yönetimi: Daha önce bahsettiğimiz gibi kontrol alanı ne kadar büyük olursa, haberleşme süreçleri de o kadar karmaşıklılaşabilir. DCS sistemleri, bu karmaşık süreçlerini daha yönetilebilir hale getirir. Altyapıda bulunan birçok farklı cihazın koordinasyonunu ve kontrolünü sağlayarak sürecin basitleşmesinde rol oynar.

Merkezi Kontrol: DCS, farklı cihazlar ve enstrümantasyonlar arasındaki iletişimi sağlar ve merkezi bir kontrol sunar. Bu da sürecin daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır.

Veri İzleme ve Analiz: Aynı PLC yapısında olduğu gibi sahadan alınan verilerin izlenerek analiz edilmesi ve bu dönütlerle birlikte sürecin değerlendirilmesinde katkı sağlar.

Uzaktan Erişim: DCS sistemleri sayesinde kullanıcı operatörler, kontrol odası ile sahaya uzaktan erişim sağlar ve süreci izleyerek, gerektiğinde müdahale edebilir (Fauci, 1997).

3) SCADA (Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama)

Sanal Kontrol ve Veri Toplama Sistemleri (SCADA), endüstriyel otomasyonun önemli bir ögesidir ve üretim süreçlerinin gözetlenmesi, kontrol edilmesi ve optimize edilmesinde hayati bir rol oynar. Diğer iletişim kontrol cihazları gibi, SCADA sistemleri endüstriyel otomasyonun bir parçası olarak kullanılır. Bu sistemler, saha cihazlarından gelen verileri toplar ve merkezi bir kontrol merkezine iletir, ardından bu verileri analiz ederek süreçlerin izlenmesini ve optimize edilmesini sağlar.

SCADA sistemleri, tipik olarak sensörler ve aktüatörlerden kaynaklanan verileri toplar. Bu veriler daha sonra merkezi bir kontrol birimine iletilir. Kontrol merkezinde bulunan SCADA yazılımı, alınan verilere bağlı olarak süreçleri gözetler, alarm ve uyarıları yönetir ve gerektiğinde müdahalede bulunur. Aynı zamanda geçmiş verileri analiz ederek süreç performansını değerlendirir.

Endüstriyel otomasyon alanında en çok kullanılan Scada çeşitleri;

- EXO Scada
- Wonderware InTouch
- Siemens WinCC
- GE Digital iFIX
- Schneider Electric Vijeo Citect
- Inductive Automation Ignition
- AVEVA System Platform
- Rockwell FactoryTalk View
- Citect SCADA
- ICONICS GENESIS64
- VTScada

SCADA sistemlerinin endüstriyel otomasyondaki önemi büyüktür. Avantajları şu şekildedir:

İzleme ve Kontrol: SCADA sistemleri, fabrikadaki kontrol süreçlerini gerçek zamanlı izler ve kontrol eder. Bu hem zamanında hata tespitini sağlarken anlık müdahaleye de izin verir.

Veri Toplama ve Analiz: Diğer kontrol sistemleri gibi SCADA kontrol sistemi de cihazlardan veriyi toplayarak analiz edilmesini sağlar.

Uzaktan Erişim: SCADA sistemleri genellikle PLC ve DCS'e göre daha geniş kapsamlı kontrol alanlarının uzaktan erişiminin izlenmesine ve müdahale edilmesinde tercih edilir. Kısaca örnek vermek gerekirse, PLC ile bremze haberleşmesini, DCS ise bremzelerin olduğu binanın haberleşme kontrolünü ve SCADA ile ise o binanın tüm kontrol sistemini kontrol etmekte tercih edilebilir. Tabi ki bu yine tamamen kullanıcının tercihinine bağlıdır (Fauci, 1997).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Küresel dünyanın ve döngüsünün beraberinde getirdiği gelişmeler her alanda olduğu gibi sivil havacılığı da doğrudan etkilemiştir. Buna bağlı olarak insanların her geçen gün sivil alanda artan uçuşları, havacılık sektöründeki bütçeleri, maliyetleri, bu alandaki istihdamı, uçak sayıları, dolayısıyla havacılık motorlarına olan ihtiyaç ve talebi arttırmış daha da önemli hale getirmiştir. Öte yandan ne yazık ki günümüzde de devam eden savaşlar veya ülkelerin kendi savunma araçlarını üretme ihtiyacı askeri alanda da aynı şekilde sektöre doğrudan katkı sağlamaktadır. Tüm bu ihtiyaç ve talepler doğrultusunda havacılık motorları her geçen gün gelişmek zorundadır. Bu bazen yolcu uçakları için daha ekonomik motor ihtiyacı doğururken, savaş ve savunma araçları içinse daha yüksek itki üreten motor anlamına gelebilir. Kaçınılmaz son olarak gelişen teknoloji gelişmeye devam edecek ve her alanda olduğu gibi havacılık sektörü de bu doğrultuda gelişmesi gerekecek ve gelişecektir. Yeni keşfedilen malzemeler, daha yüksek sıcaklığa dayanacak malzemelerin geliştirilmesi veya türetilen mukavim malzemelerle birlikte motorların daha yüksek iş yapmalarına neden olacaktır. Tüm bu gelişmelerin yanı sıra değişmeyen ama gelişmeye ve artmaya devam edecek olan nokta ise motorların veya hava araçlarının bakımı, onarımı, revizyonu ve test edilmeye devam edilmesi olacaktır.

Ürün haline gelen motorlar veya yukarıda bahsettiğimiz yeni gelişmekte ve gelişecek tüm motorların testleri bremzelerde devam edecektir. Bu da aslında motorla birlikte test altyapı sistemlerinin yani bremzelerin de gelişmesine yol açacaktır. Ülkemizde şu an hava ikmal ve TEI gibi yerleşkelerde baz bremzeler çalışmaktadır ancak gün geçtikçe Avrupa Havacılık Emniyet Ajansı (EASA) veya Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) gibi denetleyici yapıların talepleri üzerinde spesifik bremze olarak adlandırılan irtifa, eğim, darbe gibi testlere özel bremzelerin de kurulum ve test edilme ihtiyacı doğacaktır.

Bu çalışma bir test altyapı kurulum sürecini genelden özele şeklinde ele almaktadır. Öncelikle genel bina için gereksinimler belirlenip yol aldıktan sonra test odaları özelindeki çalışmalardan da bahsedilmiştir. Kurulum sürecinde ilk adım genel bina gereksinimlerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda, test altyapısının konumlandırılacağı bina, enerji

gereksinimleri, güvenlik standartları ve çevresel faktörler göz önünde bulundurulur. Buna ek olarak, test odalarının genel tasarımı, bina içindeki yerleşimleri ve temel enerji altyapısı planlamaları bu aşamada ele alınır.

Genel bina gereksinimleri belirlendikten sonra, test odalarına geçilir. Her test odası, özel test ihtiyaçlarına ve test edilecek motor tipine göre tasarlanmalıdır. Örneğin, bir turbofan motorunun testi için gereken tesisat ve altyapı, bir turboşaft motorunun testi için ihtiyaç duyulanlardan farklı olabilir. Bu nedenle, her test odası için özel tasarım ve planlamalar yapılmalıdır. Ayrıca, ürün haline gelmiş, seri üretime başlanmış ve platformlarda kullanılan motorların veri toplama kapasiteleri ile AR-GE motorlarının geliştirilme sürecindeki veri toplama kapasiteleri arasında önemli farklar bulunabilmektedir. Bu durumun temel nedeni, ürün haline gelmiş bir motordan gereğinden fazla ölçüm almaya ihtiyaç olmamasıdır. Yalnızca kritik bölgelerdeki verileri izlemek genellikle yeterlidir. Öte yandan, AR-GE motorları, geliştirme aşamasında olduklarından, testlerde doğrulama yapabilmek için mümkün olan en fazla noktadan ölçüm alınmasını gerektirebilir. Bu ayrım, veri toplama kapasiteleri belirlenirken dikkate alınmalıdır.

Test odaları özelindeki çalışmalar, odalardaki hava sirkülasyon sistemleri, yağ ve yakıt sistem altyapısı, motor başlatma altyapı sistemleri, dinamometre, güvenlik önlemleri, akustik düzenlemeler ve test odası içindeki ekipman yerleşimi gibi detayları içerir. Ayrıca, her test odası için gerekli olan kontrol sistemleri ve veri toplama donanımları da titizlikle planlanmalıdır.

Kurulum sürecinin bir diğer önemli aşaması, test altyapısının entegrasyonudur. Bu aşamada, farklı sistemlerin birbirine bağlanması ve koordinasyonu sağlanarak test süreçlerinin sorunsuz bir şekilde yürütülmesi hedeflenir. Entegrasyon süreci, test altyapısının tamamen işlevsel hale gelmesini sağlar ve motor testlerine hazır hale getirir.

Son olarak, kurulum sürecinin tamamlanmasının ardından test altyapısı kullanıma açılır ve motor testleri başlar. Bu aşamada elde edilen veriler, motorların performansının değerlendirilmesi, tasarımın optimize edilmesi ve olası sorunların tespit edilmesi için kullanılır. Bu süreç, motor üreticileri için değerli bilgiler sunar ve gelecekteki motor tasarımları için önemli bir referans oluşturur.

Bu çalışmaya başlanırken, ülkemizdeki bu sektörün hızla gelişmesine rağmen ilgili doküman ve çalışmaların az olduğu belirtilmişti. Bu çalışmanın bunların ilklerden olmasını umarak, yukarıda bahsi geçen her ayrı başlığın üzerine ayrı ayrı tüm detaylarıyla birlikte bir tez veya benzeri çalışmaların yapılmasını temenni ederim. Bu çalışmalar ülkemizde hızla artan havacılık sektöründe bir bilgi birikimi (know-how) oluşmasına katkı sağlayacaktır.

Ülke olarak savunma sanayii başta olmak üzere tüm sektörlerdeki amacımız, öncelikle milli projelerimiz ile birlikte, yurt içi ve yurt dışı savunma sanayi ve özel kuruluşlara test sistemi/komponent tasarımı ve test hizmeti sunabilecek hale gelmek olmalıdır. Bu sayede; ülkemize katma değer sağlamak, bağımlılığı azaltmak, modifikasyon ihtiyaçlarına hızlı ve doğrudan çözümler bulmak, yatırımların geri dönüşünü sağlamak, yan sanayilerimizi de geliştirerek tüm ülke sanayisine katkıda bulunmak ve geliştirmek gibi faydalar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

A.J. Martyr, & M.A. Plint. (2007). *Engine Testing*.

Anecom. (2024, January 5). *Anecom Aerotest*. <https://www.anecom.de/about-us/>

Anonim. (2020, November 1). *MODBUS Protokolü ve tüm özellikleri nelerdir?* Hubbox.

Aydınoğlu, C. (2016, February 22). *Modbus*. Elektrik Port.

Boyce, M. P. (2012). *Gas Turbine Engineering Handbook* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Defense Here. (2022). *Defense Here*. <https://www.defensehere.com/tr/turkiyenin-ilk-milli-helikopter-motoru-tei-ts1400un-sicaklik-tarama-testleri-tamamlandi>

Dyno Equip. (2023, November 15). *Dyno Equip*.

Fauci, J. La. (1997). PLC or DCS: selection and trends. *ISA Transactions*, 36(1), 21–28. [https://doi.org/10.1016/S0019-0578\(97\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0019-0578(97)00005-0)

Filippone, A., & Bojdo, N. (2014). *EFFECT OF DESERT PARTICULATE COMPOSITION ON HELICOPTER ENGINE DEGRADATION RATE*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2959.8086>

GE Aerospace. (2024, January 5). *GE Aerospace, Testing capabilities overview*. <https://www.geaerospace.com/services/test-services>

Giampaolo, T. (2020). *Gas Turbine Handbook: Principles and Practice*, (River Publishers, Ed.; 5th ed.). River Publishers.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Koçak, T. B. (2019, April 1). *Jet Çarptırma ile Gaz Türbinli Motorların Soğutulması* [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Kurban, O. (2019a). *Gaz Türbinli Motorlar Eğitim Dökümanı*.
- Kurban, O. (2019b, September 1). *Ticari Motorlarda Standart Bakım Uygulamaları*.
- Lish, T. (2015, September 28). *What is a Dynamometer and How Does it Work?* Setra.
- McLean, A. (2022, April 20). *VAROC Dynamometers: Benefits Of Turboshift Engine Testing Using Air Dynamometers*. Concept NREC.
- Mehmet, F. (2019). Havacılığın Kalbi: Gaz Türbinli Motorlar. *Defence Turk*.
<https://www.defenceturk.net/havaciligin-kalbi-gaz-turbinli-motorlar>
- Poullikkas, A. (2005). An overview of current and future sustainable gas turbine technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(5), 409–443.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.009>
- Rolls-Royce. (2005). *The Je Engine*. John Wiley & Sons.
https://books.google.com/books/about/The_Jet_Engine.html?hl=tr&id=QUQxBwAAQBAJ
- Safran Group. (2024, January 5). *Safran Group test cells*. <https://www.safran-group.com/products-services/4-test-cells-your-disposal>
- Şal, S. (2021). Gaz Türbinleri Nasıl Çalışır? Tasarım Zorlukları Nedir? *Defence Turk*.
<https://www.defenceturk.net/gaz-turbinleri-nasil-calisir-tasarim-zorluklari-nedir>
- Şirin, M. (2015). Endüstriyel Haberleşme Protokolleri. *Elektrik Port*.

KAYNAKLAR DİZİNİ

TEI. (2020, February 10). *Turboşaft Test ve Alt Sistemler Çalıştayı*.
<https://turbosaft2020.b2match.io/>

TEI. (2023, November 13). *TEI* . <https://www.tei.com.tr/tr>

Tüz, E. (2021). *Bremze Nedir? Herkes İçin Havacılık*.

Uçar, A., & Karakiş, M. (2009). *ATILIM JET MOTOR BREMZE PROJESİ*. 1–5.

Yavuz, H. (2018, June 25). *Helikopter Motoru Nasıl Çalışır ? | Turboşaft Motor Çalışma Prensipleri*.