KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEK SİLİNDİRLİ İÇTEN YANMALI BİR MOTOR İÇİN ELEKTROMEKANİK SUPAP SİSTEM TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

VOLKAN AYGÜL

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TEK SİLİNDİRLİ İÇTEN YANMALI BİR MOTOR İÇİN ELEKTROMEKANİK SUPAP SİSTEM TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

VOLKAN AYGÜL

Prof. Dr. Ahmet Necati ÖZSEZEN		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Prof. Dr. Hüseyin Metin ERTUNÇ		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Prof. Dr. Cenk SAYIN		
Jüri Üyesi,	**Marmara Üniversitesi**	**.....**
Doç. Dr. Murat AYAZ		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	**.....**
Doç. Dr. Ufuk DURMAZ		
Jüri Üyesi,	**Sakarya Üniversitesi**	**.....**

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.07.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

■ Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Kocaeli Üniversitesi BAP Birimi 2018/132 ve TÜBİTAK 114R058 no'lu projeler kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Volkan AYGÜL

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan ***"Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge"*** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
■ Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Volkan AYGÜL

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Ahmet Necati ÖZSEZEN'e, birçok zorluklarla dolu bu doktora yolculuğunda uzmanlığını ve deneyimlerini paylaşmak için ayırdığı zamanı, rehberliği ve bana olan güveni için teşekkür ederim. Doktora tez çalışmalarım sırasında kendisiyle çalışmak benim için bir ayrıcalıktı.

Ayrıca tez komitesi üyeleri Prof. Dr. Hüseyin Metin ERTUNÇ, Prof. Dr. Cenk SAYIN'a değerli zamanlarını ayırarak tezimi okuyup yorumladıkları ve bana yol gösterdikleri için teşekkür ederim.

Üzerimde emeği olan bölümdeki tüm hocalarıma ve destekleri için araştırma görevlisi arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2018/132 numaralı proje aracılığıyla sağlanan mali destek için teşekkür ederim.

TÜBİTAK tarafından 1001 kapsamında desteklenen 114058R nolu Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Bir Motorda Elektromekanik Değişken Supap Zamanlamasının Hava Akış Parametrelerine Etkisinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi projesi ile verilen mali destek için teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak; sevgili eşim Sinem AYGÜL'e, ve tüm aileme yıllar boyunca gösterdikleri sabır, cesaret, anlayış ve samimi destekleri için teşekkür ederim. Bu tezin gerçekleşmesi onların sonsuz desteği olmadan olmazdı. Bu yüzden bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum.

Hazıran-2025 Volkan AYGÜL

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
2.1. Elektromekanik Supap Mekanizması Tasarımları 5
2.2. ESM Kontrol Yapıları 17
3. MALZEME VE YÖNTEM 23
3.1. Deney Düzeneği Bileşenleri 25
3.1.1. Tek Silindirli Benzinli Motor 27
3.1.2. Elektrik Motoru 28
3.1.3. Silindir Basınç Sensörü 29
3.1.4. Kontrol Kartı ve Sürücü Devresi 30
3.1.5. Ultrasonik Debimetre AVL Flowsonic 33
3.2. Elektromekanik Supap Mekanizması Tasarımı ve Prototip İmalatı 35
3.2.1. ESM Tasarımı ve Tasarım Parametreleri 36
3.2.2. Tasarlanan 1.Tip ESM (Model 1) 40
3.2.3. Tasarlanan 2. Tip ESM (Model 2) 41
3.2.4. Tasarlanan 3. Tip ESM (Model 3A) 43
3.2.5. Tasarlanan 3.Tip ESM (Model 3B) 49
3.3. Klasik Kam Mekanizması Motor Testleri 52
3.4. Deneysel Verilerin Elde Edilmesi 53
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 55
4.1. Klasik Sistem Deney Sonuçları 55
4.1.1. Ultrasonik Debimetreden Elde Edilen Test Sonuçları 56
4.1.2. Silindir İçi Basınç Ölçümleri 57
4.1.3. Emme ve Egzoz Manifoltu Sıcaklıkları 59
4.2. Volümetrik verimin hesaplanması 60
4.3. Supap Zamanlaması 63
4.3.1. Supap Zamanlamasının Performansa Etkisi 64
4.4. Elektromekanik Supap Mekanizması (ESM) ile Yapılan Deney Sonuçları 65
4.4.1. Emme Supabı Profili 67
4.4.2. ESM ile 800 dev/dk'daki Test Sonuçları 68
4.4.3. ESM ile 1200 dev/dk'daki Test Sonuçları 70
4.4.4. ESM ile 1600 dev/dk'daki Test Sonuçları 74
4.4.5. ESM ile 2000 dev/dk'daki Test Sonuçları 76
4.4.6. ESM ile 2400 dev/dk'daki Test Sonuçları 77
4.5. Klasik Supap Mekanizması ve ESM'nin Valf Profili ve Hızı, Silindir İçi Basınçları ve Volümetrik Verim Açısından Karşılaştırması 81
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 87

KAYNAKLAR 90
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 94
ÖZGEÇMİŞ 96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. ESM CAD Tasarımı 6
Şekil 2.2. Double Solenoid Valve Actuator- DSVA 7
Şekil 2.3. Modifiye Edilmiş Hibrit Valf Sistemi (MHVA) 7
Şekil 2.4. EMVA Şematik Görünümü ve Blok Şeması 9
Şekil 2.5. EMVA Valf Profili ve Hızı 9
Şekil 2.6. EMIV Valf Profiline Bağlı Akım Grafiği 10
Şekil 2.7. Klasik Sistem ve EMIV ile Silindir İçerisine Alınan Hava Miktarları 10
Şekil 2.8. Farklı Tip EVA Modelleri 11
Şekil 2.9. Bobin Lineer Aktüatör 12
Şekil 2.10. Valf Başına Enerji Tüketimi 13
Şekil 2.11. EMVT Sitemi 14
Şekil 2.12. Valf Oturma Hızı Grafiği 15
Şekil 2.13. Önerilen Elektromanyetik Valf Aktüatörü (EMVA) 16
Şekil 2.14. Dört tip ferromanyetik malzemenin B-H (manyetik akı yoğunluğu-manyetik alan şiddeti) eğrisi 17
Şekil 2.15. Gerçek zamanlı ölçüm: İstenen konum (mavi çizgi), önerilen kontrolör kullanılarak ölçülen valf konumu (yeşil çizgi) ve Kalman filtresi ile elde edilen kontrol konumu (kırmızı çizgi) 18
Şekil 2.16. Kapalı Çevrim Kontrol Yapısı 20
Şekil 2.17. Krank Açısına Bağlı Olarak Valf Lift, Valf Hızı ve Akım Grafiği 21
Şekil 3.1. Tez çalışması akış diyagramı 24
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şeması 25
Şekil 3.3. Deney düzeneği 27
Şekil 3.4. Kistler Silindir Basınç Sensörü 30
Şekil 3.5. ESM sürücü ve kontrol devreleri (1. Kontrol Kartı, 2. Mosfet Sürücü Kartı, 3. IRFZ 540 Mosfet, 4. Fan) 31
Şekil 3.6. Mosfet sürücü kontrol sinyalleri 32
Şekil 3.7. ESM kontrol blok diyagramı 32
Şekil 3.8. AVL Flowsonic 100 Ultrasonic Debimetre 33
Şekil 3.9. Ultrasonik debimetrenin yapısı 34
Şekil 3.10. ESM'nin dinamik modeli 37
Şekil 3.11. Sistemin MATLAB/Simulink Modeli 39
Şekil 3.12. 1.Tip ESM ve Kontrol Şeması 40
Şekil 3.13. 800 dev/dk 'da 1. Tip ESM ve Klasik Sistem Valf Profili Karşılaştırılması 41
Şekil 3.14. 2. Tip ESM 43
Şekil 3.15. Model 3A 44
Şekil 3.16. Model 3A Manyetik Devre Mesh Yapısı ve Kuvvet Çizgileri 45
Şekil 3.17. Farklı Hava Aralıklarında Diske Etki Eden Manyetik Kuvvet Çizgileri 45
Şekil 3.18. Bir bobinin akım-zaman grafiği 47
Şekil 3.19. Model 3A Hava Aralığı-Kuvvet grafiği 48
Şekil 3.20. Model 3A CAD görüntüsü (1.Kapatma Bobini, 2.Açma Bobini, 3.Hareketli Disk, 4.Yay, 5.Kaplin, 6.Mil, 7.Yay Kapakları) 49
Şekil 3.21. Model 3A ve 3B Disk Tasarımları 50
Şekil 3.22. Model 3B 50

Şekil 3.23. 0,5 ve 3,5 mm hava aralığındaki kuvvet çizgileri 51
Şekil 3.24. Model 3A ve 3B Hava Aralığı-Kuvvet Grafiği 51
Şekil 3.25. Klasik Sistem Test Düzeneği 52
Şekil 3.26. Data Toplama Programı Arayüzü 54
Şekil 4.1. 800 dev/dk'daki klasik emme supabı profili 55
Şekil 4.2. 1600dev/dk'daki klasik emme supabı profili 56
Şekil 4.3. Motor Devrine Bağlı Olarak Hava Tüketim Grafiği 57
Şekil 4.4. Motor devrine göre maksimum silindir basınçları 58
Şekil 4.5. Krank açısına bağlı olarak silindir basınçları 59
Şekil 4.6. Honda GX390 Valf Zamanlaması (Aygül ve diğ., 2019) 65
Şekil 4.7. ESM'li Test Düzeneği 66
Şekil 4.8. 800 dev/dk'daki ESM Sistemin Zamana Bağlı Emme Supabı Profili 68
Şekil 4.9. ESM'li Sistemin 800 dev/dk'daki Zamana Bağlı ÜÖN, Supap Profili ve Silindir İçi Basınç Grafiği 70
Şekil 4.10. ESM'li sistemin 1200 dev/dk'da zamana bağlı ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği 72
Şekil 4.11. ESM 'li sistemin 1200 dev/dk'da emme supabı kapanma zamanı standart zamanlamaya göre 15 KMA öne çekilerek elde edilen supap profili 73
Şekil 4.12. ESM ile1600 dev/dk'da zamana bağlı ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği 75
Şekil 4.13. ESM ile 2000 dev/dk'da zamana bağlı ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği 77
Şekil 4.14. ESM ile 2400 dev/dk'da zamana bağlı ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği 79
Şekil 4.15. 800 dev/dk'da Valf profili ve hızının karşılaştırılması 83
Şekil 4.16. Klasik Sistem ve ESM Volümetrik verim Grafiği 83
Şekil 4.17. Silindir İçi Maksimum Basınç Grafiği 85

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. ESM Enerji Tüketim Tablosu 19
Tablo 3.1. Test motorunun teknik özellikleri 28
Tablo 3.2. Elektrik motoru teknik özellikleri 29
Tablo 3.3. 1.Tip ESM Teknik Özellikleri..... 40
Tablo 3.4. Model 2 Bobin özellikleri 42
Tablo 3.5. 3D Flux Analiz Sonuçları..... 42
Tablo 3.6. Model 3A Bobin özellikleri..... 43
Tablo 3.7. Model 3A Flux Analiz Sonuçları 44
Tablo 4.1. Silindire alınan ortalama hava miktarı 56
Tablo 4.2. Emme manifoldu ve egzoz çıkış sıcaklıkları..... 60
Tablo 4.3. Test Şartlarındaki Ortam Hava Değerleri..... 61
Tablo 4.4. Volümetrik Verim Değerleri 62
Tablo 4.5. ESM'li Sistemin 800dev/dk'daki Test Sonuçları 69
Tablo 4.6. ESM ile1200 dev/dk'daki test sonuçları 72
Tablo 4.7. 1600 dev/dk'daki test sonuçları..... 75
Tablo 4.8. 2000 dev/dk'daki test sonuçları..... 77
Tablo 4.9. 2400 dev/dk'daki test sonuçları..... 79
Tablo 4.10. ESM ve Klasik Kam Sistemi Karşılaştırılması 82
Tablo 4.11. Volümetrik Verim Karşılaştırılması..... 84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A : Kesit alanı [m²]
B : Manyetik Akı Yoğunluğu [T]
b : Sönüm Katsayısı [N/(m/s)]
F_b : Basınç Kuvveti [N]
F_m : Mıknatıs Çekme Kuvveti [N]
F_{yay} : Yay Kuvveti [N]
I : Akım
l : Manyetik Uzunluk
L : Endüktans
m : Hareketli Kütle[kg]
Φ : Manyetik Akı
Ψ : Bobinin Toplam Akısı

Kısaltmalar

AÖN : Alt Ölü Nokta
AÖNS : Alt Ölü Noktadan Sonra
CAD : Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
DSVA : Double Solenoid Valve Actuator (Çift Bobinli Supap Aktüatörü)
EM : Electromagnetics (Elektromanyetik)
EmSA : Emme Supabı Açılması
EmSK : Emme Supabı Kapanması
ESM : Elektromekanik Supap Mekanizması
EMIV : Electromagnetic Intake Valve (Elektromanyetik Emme Supabı)
EMVT : Electromagnetic Valve Train (Elektromanyetik Supap Treni)
EMV : Electromagnetic Valve (Elektromanyetik Supap)
FEM : Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
ISM : Inverse System Method (Ters Sistem Yöntemi)
KMA : Krank Mili Açısı
LIVC : Late Intake Valve Closing (Geç Emme Supabı Kapanması)
MMF : Magnetomotive Force (Manyetomotor Kuvvet)
MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PID : Proportional–Integral–Derivative (Kontrol Yöntemi)
PD : Proportional-Derivative (Oransal-Türevsel)
PM : Permanent Magnet (Kalıcı Mıknatıs)
PSO : Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
PWM : Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SI : Spark Ignition (Benzinli Motor)
SMC : Sliding Mode Control (Kayma Kipli Kontrol)
TDC : Top Dead Center (Üst Ölü Nokta)
ÜÖN : Üst Ölü Nokta
VVT : Variable Valve Timing (Değişken Supap Zamanlaması)

TEK SİLİNDİRLİ İÇTEN YANMALI BİR MOTOR İÇİN ELEKTROMEKANİK SUPAP SİSTEM TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, klasik kam tahrikli supap mekanizması ile elektromekanik supap mekanizması (ESM) karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve ESM sisteminin içten yanmalı motorlardaki uygulanabilirliği deneysel olarak değerlendirilmiştir. Geliştirilen ESM sistemi, tek silindirli bir benzinli motor üzerine entegre edilmiş ve farklı motor devirlerinde gerçekleştirilen testlerle sistemin performansı analiz edilmiştir. Supap hareket profilleri, lazer konum sensörleri ve TDC sensörleri aracılığıyla yüksek doğrulukla elde edilmiş; elde edilen veriler, klasik sistemle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Tez çalışması sonuçları ESM sisteminin sunduğu hassas zamanlama sayesinde özellikle düşük ve orta motor devirlerinde silindir içi hava dolumunun daha etkin gerçekleştiğini ortaya koymuştur. ESM ile elde edilen valf profilleri klasik sisteme kıyasla daha geniş ve esnek bir karakter sergilemiş; bu sayede 800–2400 dev/dk aralığında motorun volümetrik veriminde %3,5 ila %5,8 arasında değişen artışlar elde edilmiştir. Ayrıca, emme supabının açılma ve kapanma zamanlarının farklı krank mili açılarına göre ayarlandığı testlerde, valf zamanlamasındaki küçük değişimlerin dahi silindir içi dolum ve basınç karakteristiği üzerinde önemli iyileşmeler oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Yüksek devirli çalışmalarda, ESM sisteminin klasik supap profillerine yaklaştığı ve bu nedenle volümetrik verimde belirgin bir fark oluşmadığı belirlenmiştir. Bu durum, elektromanyetik sistemin fiziksel sınırlarına işaret etmekte olup, özellikle yüksek devirlerde valfin yeterli hızda açılıp kapanabilmesi için bobin tasarımında güçlendirmeye ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Elektromanyetik kuvvetin artırılmasına yönelik öneriler kapsamında, bobin boyutlarının büyütülmesi ve soğutma stratejilerinin geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Bu tez çalışması sonucunda, elektromekanik supap sistemlerinin, klasik kam mekanizmalarına kıyasla önemli yapısal ve işlevsel avantajlar sunduğu tespit edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, literatürde eksikliği hissedilen ESM'nin deneysel temelli performans analizine katkı sunmakta ve gelecekteki motor AR-GE çalışmaları için yol gösterici nitelik taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Benzinli Motor, Elektromekanik Supap Mekanizması (ESM), Silindir Gaz Basıncı, Supap Zaman Kontrolu, Volümetrik Verim.

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF AN ELECTROMECHANICAL VALVE SYSTEM FOR A SINGLE-CYLINDER INTERNAL COMBUSTION ENGINE

ABSTRACT

In this thesis study, the classical cam-driven valve mechanism and the electromechanical valve mechanism (EVM) were comparatively examined, and the applicability of the EVM system in internal combustion engines was experimentally evaluated. The developed EVM system was integrated into a single-cylinder spark-ignition engine, and its performance was analyzed through tests conducted at various engine speeds. Valve motion profiles were obtained with high precision using laser displacement sensors and TDC (Top Dead Center) sensors, and the resulting data were evaluated comparatively with those from the classical system.

The results of the study revealed that the EVM system enables more effective cylinder filling at low and medium engine speeds, primarily due to its ability to provide precise timing control. Compared to the classical system, the valve lift profiles obtained via EVM demonstrated a broader and more flexible behavior. As a result, an increase in volumetric efficiency between 3.5% and 5.8% was achieved in the speed range of 800 to 2400 rpm. Moreover, in the tests where the intake valve opening and closing times were adjusted to different crank angle positions, it was observed that even small changes in valve timing led to significant improvements in cylinder filling and in-cylinder pressure characteristics.

At higher engine speeds, the valve profiles generated by the EVM system tended to converge with those of the classical valve mechanism, resulting in no significant difference in volumetric efficiency between the two systems. This outcome indicates the physical limitations of the electromagnetic actuator, particularly in terms of achieving sufficiently rapid valve actuation at high rotational speeds. To overcome this limitation, it was determined that enhancements in coil design are necessary. Suggested improvements include increasing the coil size, raising the current supply, and developing cooling strategies to manage the associated rise in coil temperature.

As a result of this thesis, it has been concluded that electromechanical valve systems offer substantial structural and functional advantages over traditional cam-based mechanisms. In this context, the study contributes to the experimental validation of EVM systems an area still underrepresented in the literatüre and serves as a guiding reference for future R&D efforts in the field of engine technology. The findings demonstrate that EVM provides notable opportunities for optimizing combustion control, air-fuel management, and emission reduction, particularly due to its programmable valve timing and lift capabilities.

Keywords: Gasoline Engine, Electromechanical Valve Actuation (EMVA), Cylinder Gas Pressure, Valve Timing Control, Volumetric Efficiency.

1. GİRİŞ

Günümüz içten yanmalı motorlarında uzun yıllardır temel yapısal unsurlar korunmakta; motor performansını artırmak ve emisyon değerlerini iyileştirmek amacıyla çeşitli tasarım değişiklikleri yapılmaktadır. Ancak bu çalışmalar, motor performansını doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biri olan supap zamanlamasında istenen esnekliğin sağlanamaması nedeniyle sınırlı kalmaktadır. Supap zamanlaması, doğrudan kam milinin geometrik yapısına bağlı olduğundan, klasik sistemlerde optimum çalışma koşullarının tüm motor devri aralıklarında sağlanması mümkün olamamaktadır. Kam profiline dayalı mekanik değişken zamanlamalı sistemler, performansta belirli oranda iyileşmeler sunsa da yapısal kısıtlar nedeniyle sürekli değişken zamanlama (CVVL- Continuously Variable Valve Lift) potansiyelinden tam anlamıyla faydalanılamamaktadır. Bu nedenle, sonsuz değişkenlikte supap zamanlaması sağlayabilen ve kam miline ihtiyaç duymayan elektromekanik kontrollü supap sistemleri önem kazanmaktadır.

Supaplar, içten yanmalı motorlarda silindirlere hava-yakıt karışımının alınmasını ve yanma ürünlerinin dışarı atılmasını sağlayan temel akış kontrol elemanlarıdır. Klasik sistemlerde supapların zamanlaması ve açılma-kapanma profilleri, sabit kam lobu açılarına bağlıdır. Bu açılar genellikle motorun maksimum tork ürettiği devre göre optimize edilmekte olup, düşük ve yüksek devirlerde silindirlere yeterli hava akışının sağlanmasında yetersiz kalmaktadır. Bunun sonucunda, silindir içi artık gaz oranı artmakta, bu da yanma verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle motor devrinin değişken olduğu çalışma koşullarında, volümetrik verimlilikte azalmalar meydana gelmekte ve genel motor performansı düşmektedir.

Motor devrinin artmasıyla birlikte piston hızı da artmakta, bu durum içeri alınan hava-yakıt karışımının hızını ve kinetik enerjisini doğrudan etkilemektedir. Bu değişkenlik, supap zamanlamasının her bir motor devrine uygun şekilde sürekli olarak ayarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla, motor devrine bağlı olarak emme supabının açılma ve kapanma zamanlarını, aynı zamanda açılma yüksekliğini kontrol edebilen sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Böylelikle her motor devrinde silindirlere optimum dolgu sağlanabilir ve böylece motor performansı üst seviyelere taşınabilir.

Seri üretimi yapılan güncel motorlarda kullanılan değişken supap zamanlama sistemleri, kam mili üzerindeki lobları değiştirerek supap zamanlaması ve kalkış miktarını ayarlamaktadır. Ancak bu sistemler, kam profillerinin sabit olması nedeniyle özellikle ani devir değişimlerinde yeterli tepki süresi sağlayamamakta, bu durum gürültü seviyesinde artışa ve sürtünme kaynaklı enerji kayıplarına yol açmaktadır. Ayrıca bu sistemlerin üretim ve bakım maliyetlerinin yüksek olması, uygulama alanlarını kısıtlamaktadır.

Bu nedenle, kam miline bağımlılığı ortadan kaldırarak sonsuz değişkenlikte supap kontrolüne olanak tanıyan elektromekanik supap sistemlerinin (ESM) geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. ESM teknolojisi, kam mili, itici, külbütör gibi mekanik bileşenlerin kullanımını gereksiz kılarak sistemin yapısal olarak sadeleşmesini sağlar. Supapların elektromekanik aktüatörler aracılığıyla hassas bir şekilde kontrol edilmesi sayesinde, silindirlere alınan hava-yakıt karışımının zamanlaması ve miktarı doğrudan optimize edilebilir. Bu durum, motorun performansını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda emisyon değerlerinin düşürülmesine de olanak tanır.

Değişken supap zamanlaması sağlayan sistemler genel olarak dört ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu sistemler mekanik, elektro-hidrolik, elektro-pnömatik ve elektromekanik sistemler olarak adlandırılmaktadır. Bu sistemler arasında elektromekanik yapıdaki çözümler, nispeten daha az karmaşık olmaları ve mevcut motor mimarilerine entegrasyonlarının daha kolay gerçekleşmesi nedeniyle öne çıkmaktadır. Elektromekanik supap sistemlerinde supapların açılma ve kapanma zamanlamaları ile açık kalma süreleri, motor devrinden bağımsız olarak motor yüküne ve hızına göre elektronik olarak kontrol edilebilmektedir. Bu kontrol kabiliyeti sayesinde yakıt tüketiminde azalma sağlanmakta, motor tork ve güç çıktısı artırılmakta ve çevresel etkiler önemli ölçüde azaltılabilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İçten yanmalı motor Ar-Ge çalışmalarında, motor verimliliğinin artırılması, egzoz emisyonlarının azaltılması ve yakıt tüketiminin minimize edilmesi gibi hedefler içermektedir. Bu hedeflere ulaşmak amacıyla motor üreticileri, yüksek basınçlı yakıt enjeksiyon sistemleri ve değişken supap zamanlaması teknolojilerine öncelik verilmektedir. Yüksek basınçlı enjeksiyon sistemleri, yanma odasında daha homojen bir yakıt-hava karışımı sağlayarak yanma verimini artırırken, değişken supap zamanlaması sistemleri, motor çalışma koşullarına dinamik olarak uyum sağlayarak yanma sürecini optimize etmektedir. Ancak her iki teknoloji de yüksek maliyet, sistem karmaşıklığı ve bakım zorlukları gibi nedenlerle yaygın ticarileşme sürecinde bazı sınırlamalara sahiptir. Bu bağlamda elektromekanik supap kontrol sistemleri, içten yanmalı motor teknolojisinde devrimsel bir dönüşüm potansiyeli taşımasına rağmen hala teknik ve ekonomik zorluklarla karşı karşıyadır.

Kamsız sistemler motordaki kam sistemi yerine farklı mekanizmalar kullanılarak yapılan sistemlerdir. Bu sistemler literatürde genel olarak elektromekanik, elektro hidrolik ve elektro pnömatik olarak incelenmiştir.

Elektromekanik supap sistemleri, klasik kam mili mekanizmasının yerini alarak supap zamanlamasını yazılımsal olarak bağımsız bir biçimde kontrol edebilme yeteneği sunar. Bu sistemlerde, kam mili, eksantrik mil, külbütör ve itici çubuk gibi mekanik aktarma elemanlarının ortadan kaldırılması, mekanik kayıpların azaltılmasını ve daha hassas bir zamanlama optimizasyonunun gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak, motorun çalışma koşullarına göre emme ve egzoz supaplarının açılma/kapanma zamanlarının ve supap kaldırma miktarlarının gerçek zamanlı olarak ayarlanabilmesi sağlanır. Bu durum, motor performans parametrelerinin özellikle tork, güç ve yakıt tüketimi üzerinde belirgin iyileşmeler sağlarken, aynı zamanda emisyon düzeylerini de düşürmektedir (Xiaofeng ve diğ., 2021).

Kam mili bulunmayan motor konseptine ilişkin ilk fikirler 20. yüzyılın başlarında gündeme gelmiş ve özellikle 1990'lı yıllardan itibaren bu alanda bilimsel yayın ve patent sayısında önemli artışlar gözlenmiştir. Gould ve diğ., (1991), bağımsız supap kontrolünün motor verimliliği üzerindeki etkilerini incelemiş; bu doğrultuda geliştirilen prototip

sistemlerde, özellikle düşük devirli motor operasyonlarında volümetrik verimin ve yanma kararlılığının iyileştirildiği raporlanmıştır. Değişken supap zamanlaması uygulamaları ilk olarak 1980'li yıllarda Honda tarafından hayata geçirilmiş ve VTEC (Variable Valve Timing and Lift Electronic Control) teknolojisi ile bu alanda öncülük edilmiştir. Ancak bu tür mekanik sistemler, yüksek devirlerde kararlılık sorunları ve sınırlı kontrol kabiliyeti nedeniyle daha esnek çözümlerin geliştirilmesine olan ihtiyacı ortaya koymuştur (Trevett, 2005).

Alternatif çözümler arasında elektromekanik, elektro-manyetik, elektro-hidrolik ve elektro-pnömatik supap kontrol sistemleri yer almaktadır. Özellikle elektro-hidrolik sistemler, yüksek tepki süreleri ve kaldırma kontrolünde sağladıkları hassasiyet nedeniyle umut vaat etmekte; ancak bu sistemlerde karşılaşılan sıvı sızıntıları, sıcaklık kaynaklı viskozite değişimleri ve sistem ağırlığı gibi dezavantajlar geniş ölçekli kullanımını sınırlandırmaktadır (Taylor, 1997). Öte yandan elektromanyetik supap sistemleri, sistemdeki hareketli parçaların sayısının azaltılması, daha hızlı tepki süresi ve yazılımsal kontrol kolaylığı gibi avantajlar sunmaktadır. Bu tür sistemlerde tipik olarak iki elektromıknatıs, iki yay ve bir daimi mıknatıstan oluşan bir yapı kullanılır. Sistemin açık çevrim kontrolü ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, supap kapanma hızları 0,35–1 m/s arasında ölçülmüş; emme supapları için önerilen ideal kapanma hızı yaklaşık 0,2 m/s, egzoz supapları için ise 0,3 m/s olarak literatürde yer almaktadır (Theobald ve diğ., 1994; Chang ve diğ., 2002).

Özellikle elektromekanik sistemlerin modellenmesi ve denetimi üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Butzman ve diğ., (2000), sistemin doğrusal olmayan dinamik karakteristiğini ifade eden bir model önererek, pozisyon kontrolünde kullanılan PID, adaptif ve kayma kipli kontrol stratejilerinin karşılaştırmalı analizini sunmuştur. Peterson ve diğ., (2004) ise elektromekanik supap sisteminin kapalı çevrim denetimi için elektromıknatıs kuvvetlerinin detaylı analizini yaparak denetim doğruluğunu artıracak model tabanlı kontrol algoritmaları geliştirmiştir. ESM'ler üzerine yapılan çalışmalar genellikle sistemin tasarımı, tasarım parametrelerinin incelenmesi, statik ve dinamik karakteristiklerinin araştırılmasına yöneliktir (Nitu,ve diğ., 2005).

Elektromekanik supap mekanizmaları ile supap hareketleri tüm çalışma şartlarında motor devrinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bunun sonucunda da yakıt tüketimi ve

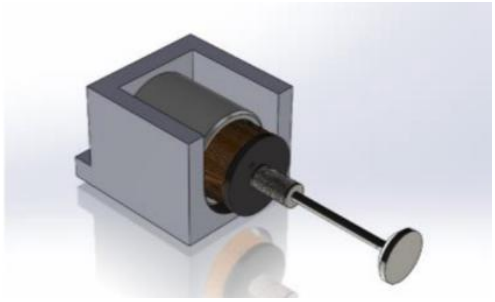
kirletici gaz emisyonları azaltılmış olur (Pischinger, ve diğ., 2000). Ayrıca, bazı çalışmalarda ESM'lerin kullanılması ile yüksek tork ve güç elde edildiği, geçici durum ve rölanti çalışması için optimum yakıt tüketimi sağlandığı ve pompalama kayıplarının azaltıldığı öne sürülmektedir (Park ve diğ., 2001).

2.1. Elektromekanik Supap Mekanizması Tasarımları

Son yıllarda içten yanmalı motorlarda kam milsiz (Kamsız) teknolojilerin geliştirilmesi hem yakıt verimliliğini artırmak hem de motor emisyonlarını azaltmak adına önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu kapsamda, elektromekanik supap mekanizmaları (ESM), valf zamanlamasının bağımsız ve dinamik olarak kontrol edilebilmesine olanak sağlayarak geleneksel kam mili sistemlerinin yerini alma potansiyeli taşımaktadır. Ancak, bu tür aktüatörlerin yüksek tepki süresi, enerji tüketimi ve konum doğruluğu gibi performans kriterleri, sistem tasarımında önemli sınırlayıcı faktörler olmaya devam etmektedir.

Elektromekanik supap (ESM) sistemlerinde farklı tasarım yaklaşımları benimsenmiş olsa da temel yapı itibarıyla bu sistemlerin birbirine oldukça benzer olduğu görülmektedir. ESM'ler genel olarak iki adet yay, iki adet bobin devresi (açma ve kapama bobinleri) ve bir adet manyetik nüve içerecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu bileşenler, sistemin çift yönlü hareketi kontrol edebilmesine olanak tanımaktadır. Yaygın olarak kullanılan tasarım mimarilerinde, E tipi mıknatıs devreleri tercih edilmekte olup, bu yapı hem manyetik akının yönlendirilmesi hem de elektromanyetik kuvvetin etkin bir şekilde üretilmesi açısından avantaj sağlamaktadır. Bununla birlikte, literatürde ve uygulamalarda silindirik ya da eliptik kesit alanına sahip alternatif ESM tasarımlarına da rastlanmaktadır. Bu farklı geometrik yaklaşımlar, sistemin yerleşim kısıtları, manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve mekanik entegrasyon ihtiyaçlarına göre tercih edilmektedir. (Kamış, 2006).

Xiaofeng ve Kun (2021), çalışmalarında, doğrusal elektromanyetik hareketli bobinli bir aktüatör tarafından kontrol edilen kamsız valf sistemi tasarlamış, prototip üretilmiş ve tam yük koşullarında tek silindirli içten yanmalı bir motor modeli (Ricardo WAVE ile simülasyonlu) kullanılarak, gaz kelebeği olmadan elde edilen performans verileri analiz edilmiştir. Tasarlanan sistem Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. ESM CAD Tasarımı (Xiaofeng ve Kun, 2021)

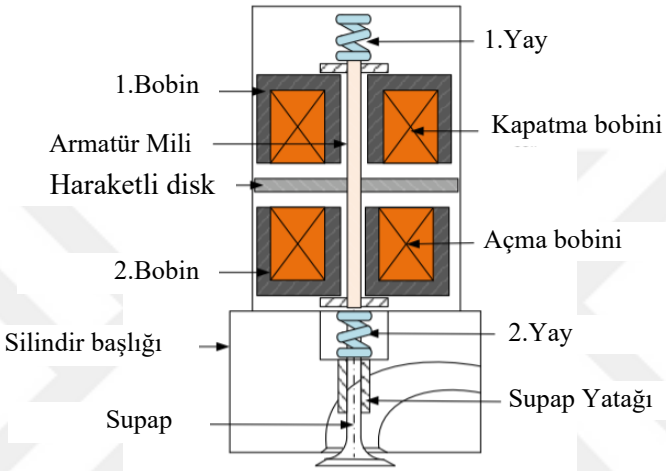
Çalışmada, hareketli bobin tipi doğrusal elektromanyetik aktüatör prototipi geliştirilmiş ve bu sistemin konum ölçümü için yenilikçi, düşük maliyetli bir doğrusal aktüatör konum sensörü (LAPS) tasarlanmıştır. LAPS sistemi, valf konumunu manyetik akı bağlantısındaki değişime dayalı olarak, gerilim ve akım geri beslemesiyle gerçek zamanlı ölçebildiği belirtilmiştir.

Elde edilen deneysel veriler, tek silindirli bir motorun Ricardo WAVE yazılımı ile oluşturulan bir boyutlu (1-D) dinamik modeline entegre edilmiştir. Tam yük koşulları altında yürütülen simülasyon sonuçlarına göre, kamsız sistemle donatılmış motorun tepe termal verimliliği %38,2'ye ulaşmış ve maksimum torkta 5 Nm'ye kadar artış sağlanmıştır. Bu değerler, geleneksel kam-milli ve gaz kelebeği kontrollü sistemlerle karşılaştırıldığında kayda değer performans kazanımlarını ortaya koymaktadır.

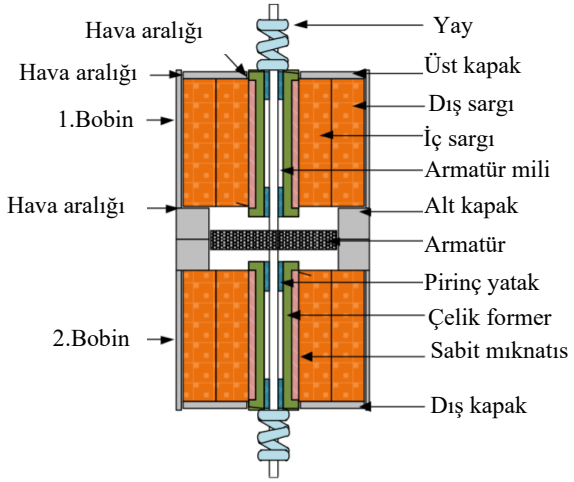
LAPS sensöründen elde edilen deneysel konum verileri ile modelden elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, sistemin yüksek ölçüm doğruluğuna sahip olduğu ve modelin gerçek davranışla yüksek tutarlılık gösterdiği tespit edilmiştir (Xiaofeng ve Kun, 2021).

Başka bir çalışmada Jawad ve diğ., (2017), değişken valf zamanlamalı kam milsiz motorlar için eksenel simetriye sahip, modifiye edilmiş hibrit bir kalıcı mıknatıs (PM) / elektromıknatıs (EM) manyeto motor kuvvetli aktüatör tasarımı önerilmektedir. Geliştirilen bu sistem, düşük enerji tüketimi, düşük bobin endüktansı, kalıcı mıknatısın demanyetizasyonuna karşı yalıtım ve iyileştirilmiş geçici durum (transient) tepkisi gibi avantajlar sunmaktadır. Yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar, denge konumunda (bobin akımı mevcutken) yaklaşık 200 N, valf tamamen açıkken (bobin akımı yokken) ise 500 N mertebesinde kuvvet üretildiğini göstermiştir. Önerilen tasarım, çift selenoidli

valf aktüatörü (Double Solenoid Valve Actuator- DSVA) ile karşılaştırılmıştır. Her iki sistemin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile elde edilen tasarımları, üretilen prototipler üzerinde yapılan deneylerle doğrulanmış ve elde edilen bulgular, önerilen aktüatör tasarımının elektromekanik valf uygulamalarında yüksek kuvvet üretimi ile enerji verimliliğini ve kontrol kabiliyetini artırabileceğini ortaya koyduğu belirtilmiştir. Çalışmalarında kullandıkları DSVA tasarımı Şekil 2.2'de, Modifiye Edilmiş Hibrit Valf Sistemi (MHVA) de Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2.Double Solenoid Valve Actuator- DSVA (Jawad ve diğ., 2017)



Şekil 2.3. Modifiye Edilmiş Hibrit Valf Sistemi (MHVA) (Jawad ve diğ., 2017)

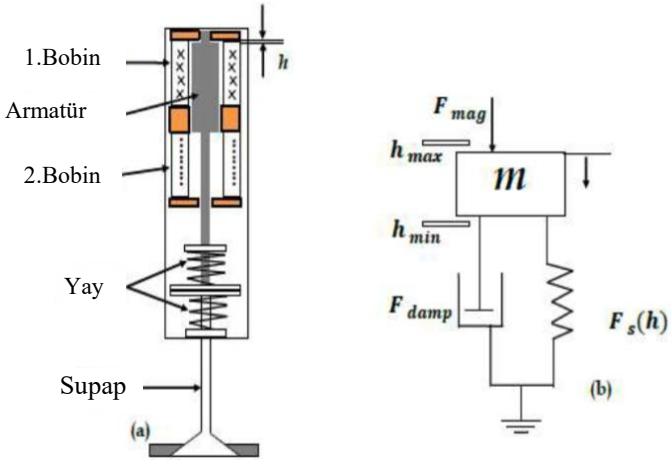
Bu çalışmadaki MHVA tasarımın en dikkat çekici avantajlarından biri, bobin endüktansının düşük tutulması sayesinde, hızlı elektromanyetik yanıt süresi ile yumuşak iniş (soft landing) ve hassas konum kontrolünün mümkün hale gelmesidir. Mıknatıslar,

özel geometrik düzenleme ile demanyetizasyona karşı izole edilerek sistem güvenilirliği artırılmıştır. Tasarlanan sistem, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile modellenmiş ve ardından üretilen prototipler üzerinde deneysel olarak doğrulanmıştır. DSVA ile karşılaştırmalı testlerde, yeni hibrit yapının kuvvet üretim kapasitesi, enerji verimliliği ve dinamik yanıt süresi açısından üstün performans sergilediği belirtilmiştir (Jawad ve diğ., 2017).

Aliyul ve Musa (2016), çalışmalarında elektromanyetik valf aktüatörlerinin (EMVA) modellenmesi, simülasyonu ve analizine odaklanmakta, kam milsiz içten yanmalı motor sistemlerinde kullanılabilecek dinamik ve enerji verimi yüksek bir aktüatör tasarımı sunmaktadırlar. Araştırmada, EMVA sisteminin dinamik davranışı kütle-yay-damper modeline dayalı olarak oluşturulmuş ve elektromanyetik kuvvet, akım, akı ve hava boşluğu ilişkileriyle tanımlanarak sistemin hareket denklemleri türetilmiştir. Elde edilen matematiksel model hem analitik (MAPLE) hem de sayısal (MATLAB/Simulink) yöntemlerle çözülmüş, bu çözümler PID kontrolü ile entegre edilerek valf hareketinin kontrolü sağlanmıştır.

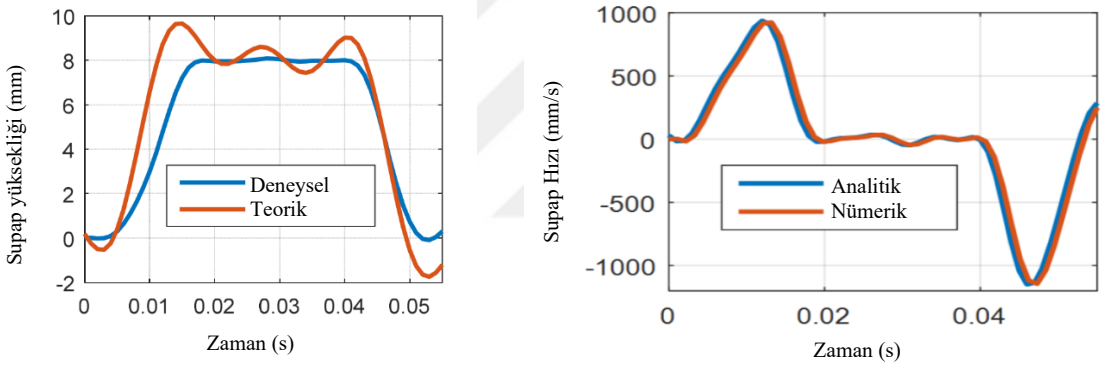
Çalışmada, özellikle valfin "açma" ve "tutma" fazlarında yumuşak iniş (soft landing), düşük geçici tepki süresi ve minimal enerji tüketimi gibi performans kriterlerine odaklanılmıştır. Valf açılma ve yer değiştirme profilleri MATLAB Curve Fitting Toolbox kullanılarak sinüs serisi şeklinde matematiksel olarak ifade edilmiş ve modelin doğruluğu deneysel verilerle karşılaştırılarak yüksek korelasyon katsayısı (R^2) ve düşük hata ölçütleri (RMSE, SSE) ile doğrulanmıştır.

Bununla birlikte, sistemin uzun dönemli çalışma güvenilirliği açısından kritik olan valf oturma hızı, yaklaşık 0.048 m/s olarak ölçülmüştür. Bu değer, mekanik aşınmayı ve akustik gürültüyü azaltan kararlı bir davranış ortaya koymuştur. Dolayısıyla, önerilen EMVA tasarımının hem enerji verimliliği hem de mekanik dayanıklılık açısından yüksek performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Şekil 2.4'de ise araştırmada önerilen elektromanyetik valf aktüatörü tasarımı şematik olarak sunulmaktadır (Aliyul ve Musa, 2016).



Şekil 2.4. EMVA Şematik Görünümü ve Blok Şeması (Aliyul ve Musa, 2016)

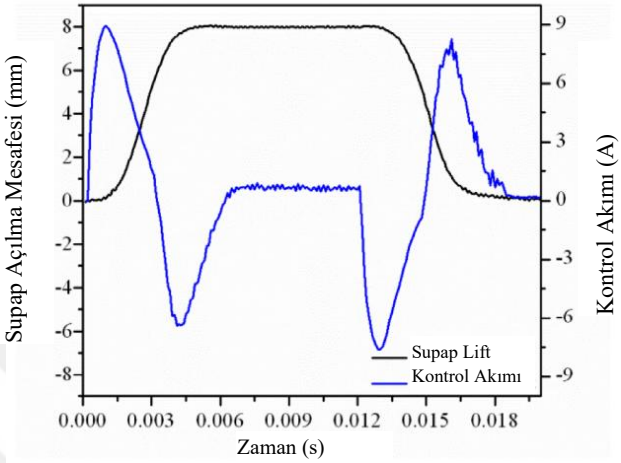
Ayrıca çalışmada valf profili ve hızı deneysel ve simülasyon sonuçları bakımından karşılaştırılmış ve Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



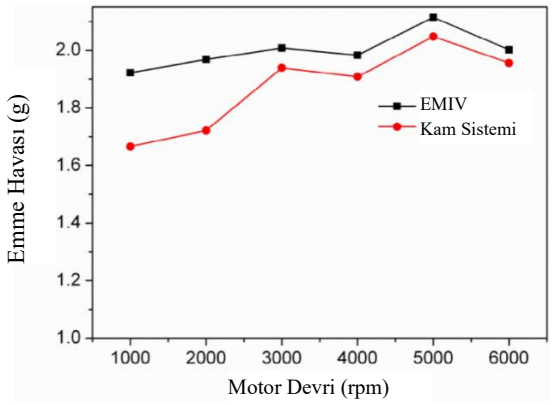
Şekil 2.5. EMVA Valf Profili ve Hızı (Aliyul ve Musa, 2016)

Jiangtao ve diğ., (2016) çalışmalarında, elektromanyetik emme valf mekanizmasını (EMIV) olarak isimlendirmişlerdir. Bu sistemin benzinli motorlarda emme (intake charging) davranışına etkilerini detaylı biçimde incelemişlerdir. Yürütülen deneysel ve sayısal analizler, EMIV uygulamasının düşük devirli koşullarda daha az valf kaldırma gerektirdiğini, böylelikle emme basıncı artışıyla pompalama kayıplarında azalma sağladığını ortaya koymuştur. Yüksek devirlerde ise EMIV'nin valf zamanlamasında sunduğu esneklik, volümetrik verimliliği iyileştirerek motor performansını arttırdığı öne sürülmüştür. Ayrıca EMIV sistemlerinin özellikle sıkıştırmalı ateşleme motorlarında daha yüksek termal verim ve emisyon kontrolü ve düşük elektrik tüketimi gibi çok yönlü faydalar sunduğu literatürde yer bulmuştur. Bu kapsamlı değerlendirme, EMIV

teknolojisinin modern benzinli motor tasarımlarında verimlilik, emisyon ve dinamik kontrol açısından umut vadeden bir çözüm olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada ortaya konan sonuçlar; EMIV valf profiline bağlı akım grafiği Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de ise klasik sistem ve EMIV ile silindir içerisine alınan hava miktarları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. EMIV Valf Profiline Bağlı Akım Grafiği (Jiangtao ve diğ., 2016)

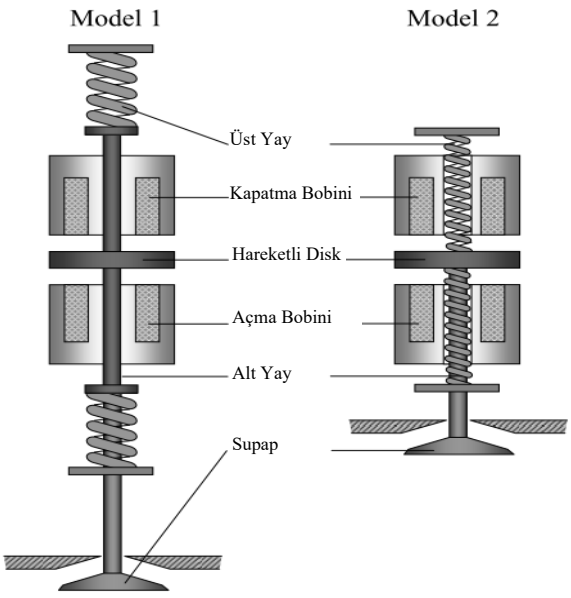


Şekil 2.7. Klasik Sistem ve EMIV ile Silindir İçerisine Alınan Hava Miktarları (Jiangtao ve diğ., 2016)

Kam mili mekanizması ile karşılaştırıldığında, değişken hızlarda EMIV'li motorlarda emme hava miktarının daha fazla olduğu belirtilmiştir. Motor devri 1000 rpm ile 6000 rpm arasında olduğunda, maksimum emme havası miktarı ortalaması %7,132 oranında artmış göstermiştir ve 1000 rpm'de bu değer en yüksek miktar olarak %18,3 oranında olmuştur (Jiangtao ve diğ., 2016).

Kamış ve Topçu (2016) çalışmalarında, elektromekanik valf aktüatörlerinde (EVA) kullanılan manyetik devre tasarım parametrelerinin, sistemin statik ve dinamik

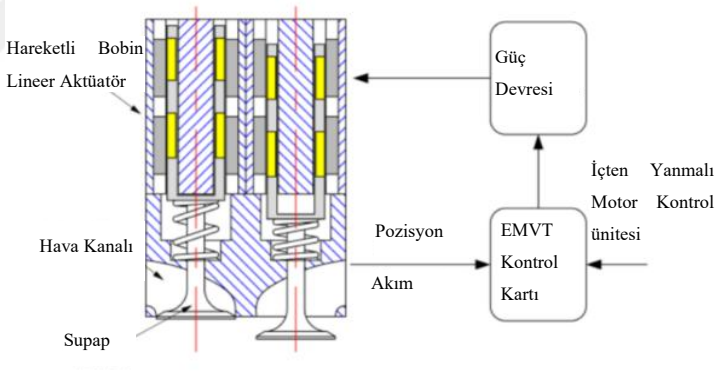
performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmada, disk tipli manyetik devreler kullanan iki farklı EVA modeli tasarlanmış ve yay sabiti, hareketli kütle, besleme voltajı ile tutma kuvveti gibi parametrelerinin aktüatör üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sistem, Newton'un ikinci yasasına dayandırılan kütle-yay-sönüm dinamiği ve elektromanyetik denklemlere dayalı bir modelle tanımlanmış, statik ve sayısal çözümler MATLAB/Simulink ortamında analiz edilmiştir. Prototipler üzerinde yürütülen deneysel doğrulamalar, simülasyon sonuçlarıyla yüksek düzeyde doğruluk ve tutarlılık gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, parametre çalışmaları göstermiştir ki; yay sabiti ve hareketli kütle gibi mekanik yapı parametreleri, valf tepkime süresine ve hızına doğrudan etki etmekte, bobin besleme voltajı ve tutma akımı ise enerji tüketimi ile dinamik yanıt üzerinde önemli kontrol imkanı sağlamaktadır. Bu analizler, disk tipi manyetik devrelerin kompakt yapılarına rağmen yüksek kuvvet üretimi ile düşük geçici zaman yanıtları elde edilebileceğini ortaya koymakta ve EVA tasarımlarında parametre uyumunun kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır. Şekil 2.8' de çalışmada kullanılan EVA tasarımları gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Farklı Tip EVA Modelleri (Kamış ve Topçu, 2016)

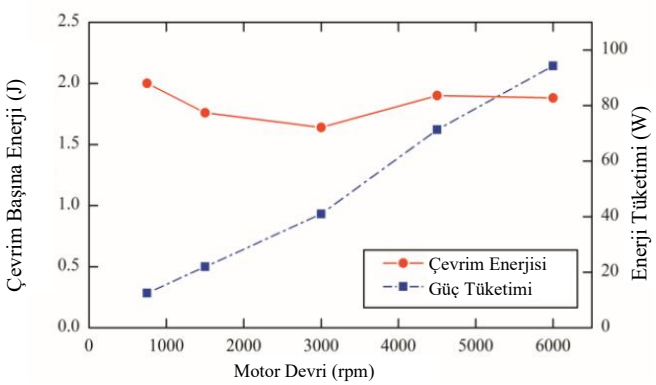
Bu avantajlarının yanında ESM'lerin verimlilikleri ve enerji tüketimleri de önem kazanmaktadır. Liang ve Siqin (2015), çalışmalarında elektromekanik valf mekanizmalarının (EMVT) enerji tüketimini detaylı biçimde analiz etmiştir. EMVT enerjisinin büyük kısmı, mekanik kayıplar (sürtünme etkisi ve silindir gaz basıncı) ile

bakır kayıplarına (bobin direnci) bağlı olarak ısı şeklinde harcanmaktadır. Demir çekirdek kayıpları ise kalıcı mıknatıs etkisi nedeniyle ihmal edilebilecek düzeyde olduğu belirtilmiştir. Valf açılma ve kapanma süreçlerindeki (transition time) enerji tüketimi en yüksek düzeye ulaşırken, açık veya kapalı tutma evrelerinde küçük akımların yeterli olduğu aktarılmıştır. Bu durum, valf süresi sabit tutulduğunda, devir sayısının artmasına paralel olarak elektrik güç tüketimini neredeyse doğrusal olarak artırmaktadır. Ayrıca, valf zamanlaması, valf kaldırma yüksekliği ve silindir başına valf sayısı gibi parametreler enerji tüketimini önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin, 1500 rpm'de valf açık kalma süresi artırıldığında enerji tüketimi azalırken pompalama kayıpları artmakta, buna karşılık valf kaldırma yüksekliği yükseldikçe pompalama kaybı düşmekte ancak bu durumda enerji tüketimi artmaktadır. Ayrıca, valf devre dışı bırakma yöntemi (deactivation), PMEP'de %86 artış sağlarken EMVT güç tüketimini yaklaşık %31 azaltmaktadır. Bu analizler, EMVT sistemlerinin tasarım ve kontrolünde hem motor verimliliğini artırmak hem de sistem enerji tüketimini minimize etmek için zamanlama, kaldırma ve devir bazlı optimizasyonun kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2.9. Hareketli Bobin Lineer Aktüatör (Liang ve Siqin, 2015)

Konvansiyonel motorlarda valf sistemi, düşük motor devirlerinde bir çevrim başına yüksek motor hızlarına kıyasla daha fazla enerji tüketmektedir. Bunun temel nedeni, düşük devirlerde sürtünme torkunun daha büyük olmasıdır. Motor devri arttıkça, etkin yağlama sayesinde valf sistemine etkiyen sürtünme torku azalmaktadır. (Wang ve diğ., 2006). Elektromekanik valf treni (EMVT) için farklı motor devirlerinde bir emme valfi başına düşen deneysel enerji ve güç tüketimi değerleri Şekil 2.10'da sunulmaktadır.



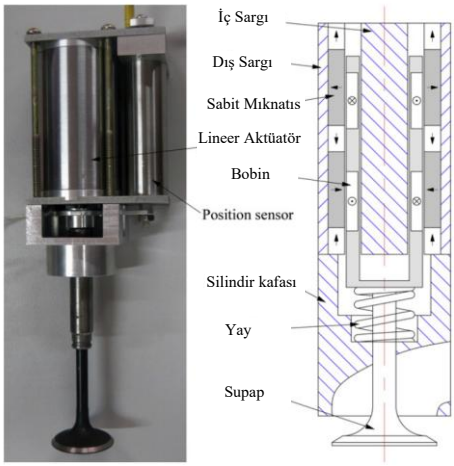
Şekil 2.10. Valf Başına Enerji Tüketimi

Bunun yanında elektromekanik sistemlerin valf oturma hızları da önemli parametrelerden biridir. Liang ve Siqin, (2011) çalışmalarında, motorların elektromekanik valf sistemlerinin valf oturma (seating) performansının iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Araştırmada, valf sonlandırma (landing) hareketindeki aşırı hızın neden olduğu mekanik gürültü, aşınma ve olası dinamik etkileri hem simülasyon hem deneysel sonuçlar ışığında şekilde analiz edilmiştir. Öncelikle, kütle-yay-sönüm dinamiğini içeren bir model çıkarılmış, valf oturma yüzeyine inişte hedeflenen hız profili belirlenerek düzeltme stratejileri geliştirilmiştir. Bu kapsamda, elektromanyetik aktüatörün kontrol parametrelerinde (örneğin, bobin akımı yükselme oranları, kapalı çevrim kazançlarının ayarlanması, ileri besleme ilavesi) yapılan değişikliklerin valf oturma hızı ve konum hatasında ne derecede etkili olduğu değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, optimize edilmiş kontrol parametrelerinin uygulanmasıyla valf iniş hızlarının düşürüldüğü, mekanik etkilerin hafifletildiği ve gürültü ile aşınma potansiyelinin azaldığı gözlemlenmiştir. Valf oturma hızında sağlanan düşüşle birlikte sistemin hem dayanıklılık hem süreklilik açısından anlamlı derecede iyileştiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu iyileştirmeler, elektromekanik valf mekanizmalarının uzun vadeli güvenilirliğini arttırdığı öne sürülmüştür.

Bazı çalışmalar, valf oturma hızı kontrolü konusunda etkili sonuçlar ortaya koymaktadır. Ancak, bu çalışmalarda kullanılan elektromekanik valf aktüatörleri (EMVA) veya elektrohidrolik valf aktüatörleri (EHVA) çeşitli sınırlamalara sahiptir. EMVA sistemlerinde, hareketli diskin çekirdek yüzeyine yaklaşmasıyla elektromanyetik kuvvetin ani şekilde artması, valfin iniş hızını sınırlamayı güçleştirmekte ve bu durum ancak karmaşık kontrol stratejileri ile yönetilebilmektedir (Alex ve diğ., 2003). Bu tür

kontrol algoritmaları ise genellikle daha yüksek donanım maliyetleri doğurmaktadır. Öte yandan, EHVA sistemlerinin literatürde yüksek enerji tüketimi ve motor ömrü boyunca tekrarlanabilir valf hareketi yeteneğinde düşüş gibi potansiyel sorunlara sahip olduğu bildirilmiştir.

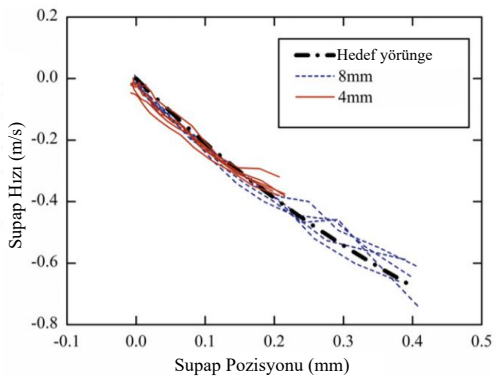
Bu çalışma, valf hareketi için hareketli bobinli doğrusal bir aktüatör kullanmakta olup, sistem EMVA sınıfında yer almaktadır. Ancak, kullanılan yapı elektromıknatıs yerine hareketli bobin içerdiğinden, bu makalede önerilen sistem elektromanyetik valf sistemi (EMVT) olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2.11. EMVT Sitemi (Liang ve Siqin, 2011)

Bu çalışmada EMVT sisteminde, her motor valfini sürmek üzere özel olarak tasarlanmış bir hareketli bobinli doğrusal aktüatör kullanılmaktadır. Bu aktüatör, düşük mekanik ve elektriksel zaman sabitleriyle yüksek tepki hızına sahiptir. Şekil 2.11'de gösterildiği üzere, sistem; hareketli bobin, kalıcı mıknatıslar, iç çekirdek ve dış çekirdekten oluşmaktadır. Halbach tipi mıknatıs dizilimi, kuvvet üretimini en üst düzeye çıkarmak amacıyla tercih edilmiştir. Bobine akım uygulandığında, Lorentz kuvveti oluşmakta ve bu kuvvet bobini harekete geçirmektedir. Akım yönüne bağlı olarak kuvvet iki yönlü üretilebildiğinden, valf açma ve kapama işlemleri aynı yapı üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Aktüatörün ürettiği kuvvet, uygulanan akımla neredeyse doğru orantılı olduğundan, sistemin hassas hareket kontrolü için son derece elverişli bir yapı sunduğu belirtilmiştir. Güç kesildiğinde valfi kapalı konumda tutmak amacıyla düşük sertliğe sahip tek bir yay kullanılmaktadır.

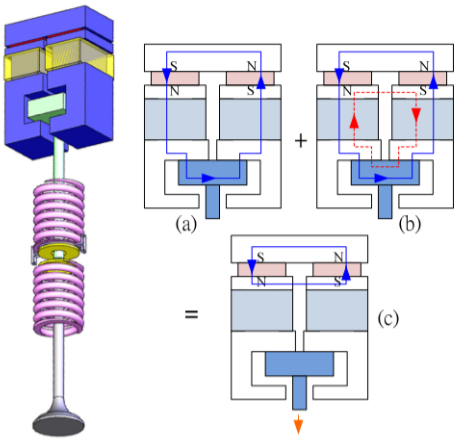
Çoğu motor çalışma koşulunda, valf yaklaşık 4 ms geçiş süresiyle 8 mm açılmaktadır. Ancak, özel motor işletme senaryolarında motor performansını artırmak amacıyla değişken valf kaldırma yüksekliği (variable valve lift) de gereklidir ve başarıyla uygulanmıştır. Bu bağlamda, maksimum valf kaldırma seviyeleri olan 8 mm ve 4 mm için valf oturma (seating) süreçleri test edilmiş ve karşılaştırılmıştır ve sonuçlar beş ayrı test için her kaldırma yüksekliğinde elde edilen valf lift ve valf hız profili, Şekil 2.12'de sunulmaktadır. Oturma süreci, 8 mm maksimum kaldırma yüksekliğinde valf pozisyonu 0,4 mm'ye ulaştığında; 4 mm maksimum kaldırmada ise 0,2 mm pozisyonunda başlamaktadır. Şekil 2.12'den de anlaşılacağı üzere, valf hareketi hedef yörüngeyi yüksek hassasiyetle takip etmekte ve ortalama oturma hızı yaklaşık 0,03 m/s olarak ölçülmektedir. Elde edilen hareket profili, yüksek tekrarlanabilirlik (repeatability) sergilemekte olup, sistemin güvenilir kontrol performansına sahip olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.12. Valf Oturma Hızı Grafiği (Liang ve Siqin , 2011)

Jieng-Jang ve diğ., (2008), çalışmalarında, kamsız içten yanmalı motorlar için yenilikçi bir hibrit mıknatıs-elektromıknatıs (PM/EM) tabanlı elektromekanik valf aktüatörü (EMVA) tasarımı önermişlerdir. Önerilen yapı, bobin tarafından oluşturulan manyetik akı ile kalıcı mıknatısların (PM) akısını hibrid bir MMF (magnetomotive force) kanalı üzerinden birleştirerek hem yüksek valf hareket gücü hem de düşük enerji tüketimi elde etmeyi hedeflemişlerdir. Mekanizmada kullanılan Halbach mıknatıs dizilimi, manyetik akıyı eksenel yönde yoğunlaştırarak kuvvet üretimini artırmakta ve kalıcı mıknatısların demanyetizasyon sorununu, önerilen MMF yapısı sayesinde önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, sistem kompakt uygulanabilirlik, yüksek sıcaklık toleransı, hızlı transient yanıt ve düşük başlangıç akımı ihtiyacı gibi tasarım avantajlarına sahiptir.

Önerilen tasarımın analizi hem FEM tabanlı simülasyonlar ile hem de motor kapağı üzerinde üretilmiş prototipler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, hibrit MMF aktüatörünün, enerji gereksinimini düşürürken valf kontrol performansını artırdığını, geleneksel EMV sistemlerine kıyasla daha kısa geçiş süreleri ve yumuşak oturma (soft landing) elde ettiğini göstermektedir.



Şekil 2.13. Önerilen Elektromanyetik Valf Aktüatörü (EMVA) (Jieng-Jang ve diğ., 2008)

Yapılan çalışmada EMVA armatürün konumunu kontrol etmek için iki bağımsız manyetik akı döngüsü kullanır:

- Döngü 1 (Kesintisiz Çizgi):

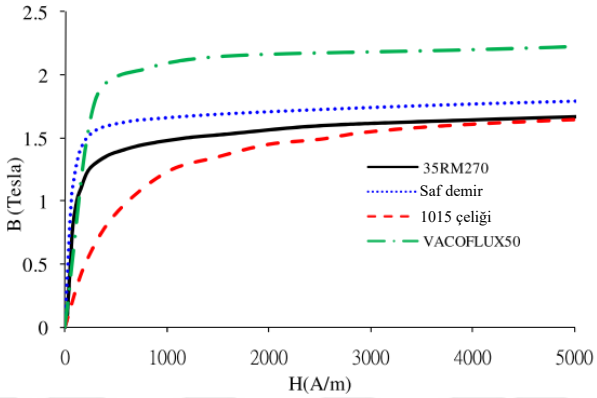
Bu manyetik devre, armatürün hareketsiz bir şekilde tutulmasını sağlamak için kuvvet üretir. Kararlı bir manyetik alan oluşturarak, armatürün istenilen konumda (örneğin açık veya kapalı) tutulmasını sağlar.

- Döngü 2 (Noktalı Çizgi):

Bu ikincil manyetik devre, armatürün serbest bırakılması için kullanılır. Döngü 1'deki akıya karşı bir kuvvet oluşturarak net tutma kuvvetini azaltır ve böylece armatürün varsayılan konumuna dönmesine (yay yardımıyla) olanak tanır.

Ayrıca ESM sistemlerinde kullanılan ferromanyetik malzememin de önemli etkileri bulunmaktadır. Çalışmada dört farklı ferromanyetik malzemenin manyetik özellikleri de incelenmiştir ve Şekil 2.14'de grafik olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, malzemelerin manyetik doygunluk davranışlarının belirgin biçimde farklılık gösterdiği görülmektedir. Bu malzemeler arasında silisyum çeliği (35RM270), lamine yapısı sayesinde düşük eddy akımı kaybı ile öne çıkarken; VACOFLUX50, en yüksek manyetik

doygunluk yoğunluğuna sahip olmasına rağmen yüksek maliyeti nedeniyle sınırlı tercih edilmektedir. Saf demir, daha yüksek doygunluk özelliği göstermesine rağmen, mekanik dayanımı, düşük karbonlu çelik (Steel 1015)'e göre daha zayıftır. Tüm bu faktörler göz önünde bulundurularak bu çalışmada, çekirdek (core) malzemesi olarak silisyum çeliği, hareketli malzemesi olarak ise düşük karbonlu çelik tercih edilmiştir (Jieng-Jang L., ve diğ., 2008).



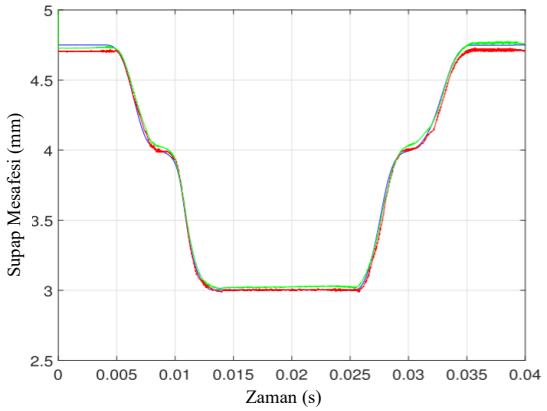
Şekil 2.14. Dört tip ferromanyetik malzemenin B-H (manyetik akı yoğunluğu-manyetik alan şiddeti) eğrisi (GMBH, 2001), (Jieng-Jang ve diğ., 2008)

2.2. ESM Kontrol Yapıları

Elektromekanik supap sistemleri genel olarak lineer selenoidler, manyetik tutucular, çift bobinli aktüatörler ve yay mekanizmaları ile desteklenen kontrol yapılarından oluşturmaktadır. Özellikle çift kutuplu elektromıknatıs yapıları, supapların açık ve kapalı konumlarında güvenli şekilde tutulmasını sağlarken, yay kuvveti yardımıyla enerji verimliliği artırılabilmektedir. Tüm bu parametrelere bağlı olarak farklı tasarımlar önceki bölümde belirtilmiştir. Bu tasarımlara ek olarak ESM'lerin kontrol sistemleri de önemli farklılıklar ve verim sağlamaktadır. Bu bölümde literatürde yapılan ESM kontrol çalışmaları özetlenmiştir.

Kontrol yapıları açısından, bu tür aktüatörlerin yüksek hızlı ve kararlı çalışabilmesi için gelişmiş sürücü devreleri, PWM sinyal üretimi, kapalı çevrim kontrol algoritmaları (ör. PID, bulanık mantık, adaptif kontrol) ve geri besleme sensörleri kullanılmaktadır. Ayrıca, manyetik devre tasarımı, histerisiz etkileri, doygunluk davranışı ve ısı yönetimi, sistem performansını doğrudan etkileyen kritik parametrelerdir.

Mercorelli (2017), çalışmalarında içten yanmalı motorların emme supaplarını, ek bir hareket sensörü kullanmadan, yalnızca elektrik sinyallerine (örneğin bobin akımı veya gerilimi) dayanarak kontrol etmeyi amaçlamaktadır. Bu "sensörsüz kontrol" yaklaşımı, sistem maliyetini ve karmaşıklığını azaltırken, güvenilir ve yüksek performanslı valf kontrolu sağladığı iddia edilmiştir. Makalede, motorun emme supabının konumunun tahmin edilmesini sağlayan bir kontrol yöntemi önerilmiş ve böylece konum sensörü kullanmadan kontrol gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Aktüatörün kontrolü, PD (oransal-türevsel) denetleyiciler ile gerçekleştirilmiş, aynı zamanda ileri besleme (feed forward) yapısı eklenerek durağan hal hataları azaltılmıştır. Şekil 2.15'de sistemin istenen konumu mavi çizgi ile, önerilen kontrolör yöntemi kullanılarak elde edilen konum yeşil çizgi ile ve Kalman filtresi ile elde edilen kontrol konumu ise kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Gerçek zamanlı ölçüm: İstenen konum (mavi çizgi), önerilen kontrolör kullanılarak ölçülen valf konumu (yeşil çizgi) ve Kalman filtresi ile elde edilen kontrol konumu (kırmızı çizgi) (Mercorelli, 2017)

Gelecekteki çalışmalar kapsamında, model tabanlı kestirimci kontrol gibi daha gelişmiş yöntemlerin veya genel anlamda optimizasyon tabanlı kontrol stratejilerinin geliştirilmesi, kontrol performansının daha da iyileştirilmesi açısından önerilmektedir (Mercorelli, 2017).

Roozbeh ve diğ., (2017) çalışmalarında, elektromekanik supap sistemi için Sliding Mode Control (SMC) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasıyla ayarlanmış bir kontrolör tasarlanmışlardır. Sistem tasarımındaki temel zorluklar arasında, supap hareketinin hassas şekilde izlenmesi, supap oturma hızının optimize edilmesi ve supabın açılma-kapanma sürecinde geçici durum yanıt süresinin (transient time) minimize edilmesi yer almaktadır. Çalışmada yapılan simülasyonlar, PSO algoritmasının SMC

parametrelerinin optimizasyonunda etkili olduğunu ve sistem yanıtını önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, önerilen denetleyicinin robust yapısı sayesinde, dış bozucu etkilerin supap konumu üzerindeki olumsuz etkileri önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu sonuçlar, PSO tabanlı SMC stratejisinin EMV sistemleri için etkili, dayanıklı ve yüksek performanslı bir kontrol yaklaşımı sunduğunu ortaya koymaktadır.

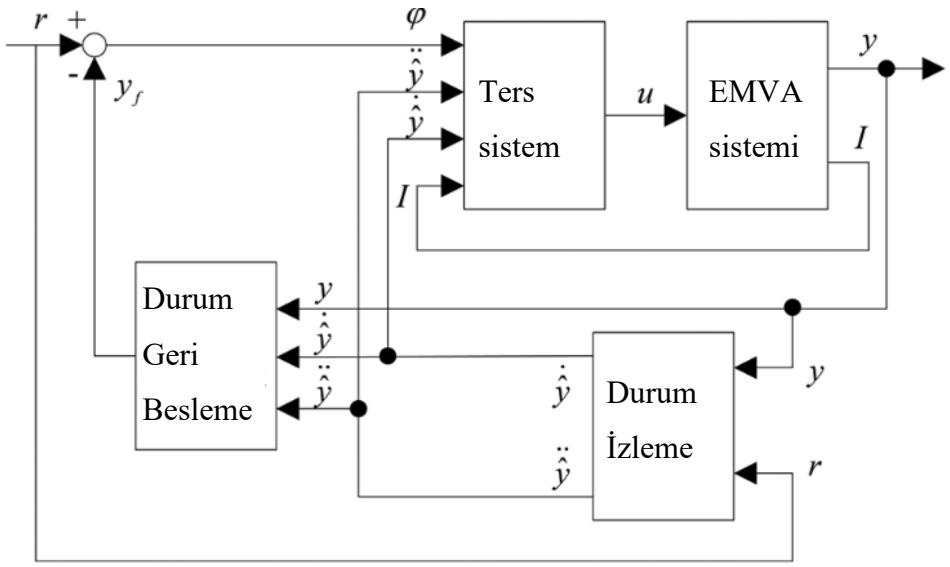
Seethaler ve diğ., (2013), çalışmalarında, tek silindirli içten yanmalı bir motor üzerinde elektromekanik supap mekanizmasının pozisyon kontrolü için kapalı çevrim kontrol algoritması uygulamışlardır. Bu çalışmada, daha önce geliştirilen iki farklı supap hareket denetleyicisi, tek silindirli bir test motoru üzerinde deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, yapılan enerji analizinde, elektromekanik sistemde elektriksel enerji tüketiminin, düşük sürtünmeli geleneksel kam tabanlı sistemlerle karşılaştırılabilir düzeyde olduğu gösterilmiştir. Enerji tüketim değerleri Tablo 2.1'da gösterilmiştir.

Tablo 2.1. ESM Enerji Tüketim Tablosu (Seethaler ve diğ., 2013)

RPM	**Emme 800**	**Emme 1600**	**Egzoz 800**	**Egzoz 1600**
Tutma Enerjisi [J]	3.4	1.6	2.0	1.0
Açma Enerjisi [J]	0.8	0.8	0.5	0.5
Kapama Enerjisi [J]	1.4	1.4	1.1	1.1
Çevrim Başına Enerji [J]	5.6	3.8	3.6	2.6
Güç (çevrim/supap) [W]	37	51	24	35

Liu ve Chang (2011), çalışmalarında, hareketli bobinli elektromekanik supap mekanizması için tam değişken supap kontrolü (Fully Variable Valve Actuation) için, Ters Sistem Yöntemi (Inverse System Method, ISM) temelli bir kapalı çevrim kontrol yaklaşımı önerilmektedir. Öncelikle sistemin dinamik modeli geliştirilmiş, ardından bu modelin ters sistemi çıkarılarak doğrusal hale dönüştürülmüştür. Simülasyon analizleri, ISM tabanlı kontrolün klasik PID kontrol ile karşılaştırıldığında önemli avantajlar sunduğunu göstermiştir; özellikle yüzde 50'ye kadar parametre değişimlerine karşı yüksek sağlamlık (robustness) sergilemiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalar ile simülasyonlar birebir uyum gösterdiği belirtilmiştir. Kontrol performansı açısından, sistem 3,8 ms geçiş süresi ve 0,05 m/s supap oturma hızı değerleriyle başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Böylece, önerilen ISM tabanlı strateji hem hassas supap hareket kontrolü hem de değişken parametreler ve dış etkiler karşısında kararlı performans sağlamasıyla,

kamsız motor için güçlü bir kontrol çözümü olduğu belirtilmiştir. Sistemin kontrol yapısı Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



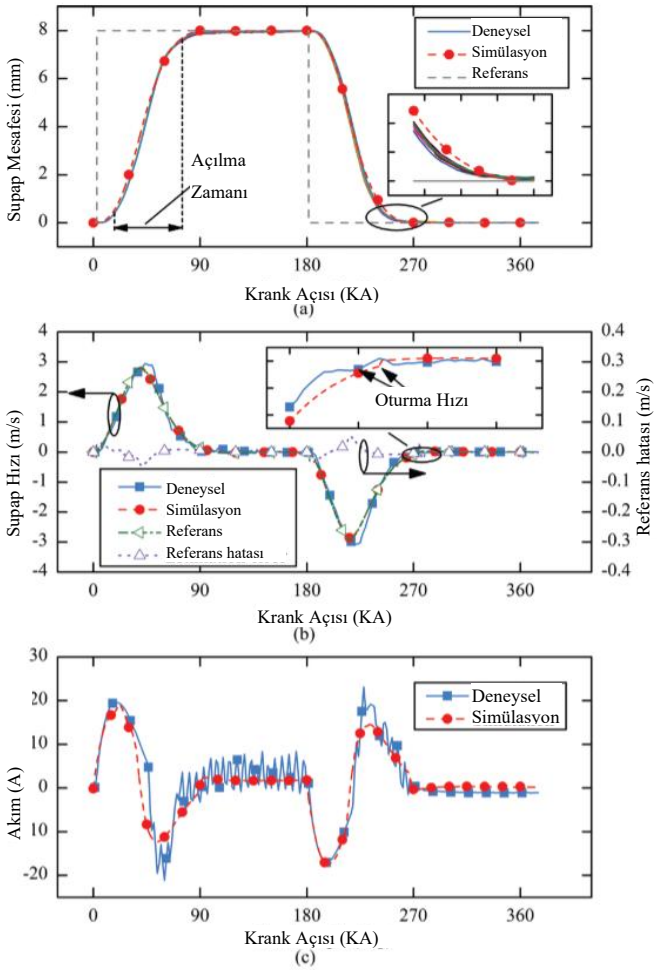
Şekil 2.16. Kapalı Çevrim Kontrol Yapısı (Liu ve Chang, 2011)

Şekil 2.17'de 2500 dev/dk motor devrinde krank açısına bağlı olarak supap kaldırma profili, supap hızı ve bobin akımları ayrıntılı şekilde gösterilmektedir. Bu şekilde, deneysel olarak elde edilen supap kaldırma ve hız profilleri, benzetim (simülasyon) sonuçları ile karşılaştırmalı olarak sunularak modelin doğruluğu ortaya konmuştur. Çalışmada referans supap kaldırma değeri 8 mm olarak belirlenmiş olup, tüm değerlendirmeler bu temel değer üzerinden yapılmıştır.

Şekil 2.17 (a)'da birbirinin üzerine bindirilmiş 10 çevrime ait deneysel supap kaldırma profilleri yer almakta ve sonuçlar, sistemin oldukça tekrarlanabilir bir supap hareketi ürettiğini göstermektedir. Bu durum, elektromanyetik supap aktüatörünün dinamik kararlılığını ve sürekli çalışmada güvenilirliğini destekleyen önemli bir bulgudur. Ayrıca deneysel profillerde gözlenen küçük farklılıkların sistematik olmadığı ve ölçüm hassasiyetinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Elde edilen veriler ışığında hem benzetim hem de deneysel ölçümlerde supabın açılma süresi yaklaşık 3.8 ms olarak belirlenmiştir. Bu sürenin, 6000 dev/dak motor hızında gerçekleşen tipik bir supap hareketine karşılık geldiği vurgulanmaktadır. Dolayısıyla, 2500 dev/dk gibi görece düşük bir hızda dahi sistemin yüksek devir koşullarında gerekli supap dinamiklerini sağlayabildiği gösterilmiştir. Bu sonuç, elektromanyetik supap

aktüatörünün hem düşük hem de yüksek motor hızlarında güvenilir çalışabileceğini ve modelleme–benzetim sonuçlarının deneysel verilerle yüksek uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.17. Krank Açısına Bağlı Olarak Valf Lift, Valf Hızı ve Akım Grafiği (Liu ve Chang, 2011)

Elektromekanik supap kontrol yapıları, klasik kam tahrikli sistemlere göre yüksek hassasiyet, enerji verimliliği ve esneklik sunar. Ancak, bu yapıların motor içindeki termal, dinamik ve akustik zorluklara karşı dayanıklı olması, gelişmiş kontrol algoritmaları ile mümkün hale gelmektedir. Gelecekte, bu sistemlerin sensörsüz kontrol, düşük enerji tüketimi ve yüksek hızlarda güvenilirlik gibi hedeflerle daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

Bu avantajlarının yanında ESM'lerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu tip supap mekanizmalarında, supabın hızlı bir şekilde kapanabilmesi için sert yaylar tercih

edilmektedir. Bu tip mekanizmalarda, yay kuvveti ile supabın geri gelme hızı kritik bir problemdir. Geleneksel sistemde supap hareketi kam profili tarafından kontrol edildiğinden, supap geri getirme yayının hızı kam profili açılarını takip etmektedir. Bununla birlikte, kamsız elektromekanik sistemlerde supap oturma hızını belirli bir seviyede tutmak zor olmaktadır. Supap geri çekme hızının yüksek olduğu durumlarda aşınma ve gürültü problemleri meydana gelmektedir. Bu problemi çözmek için yapılan çalışmalarda kapsamlı bir kontrol analizi yapılmasına rağmen ve çevrimden çevrime supap kontrolünde zorluklar yaşanmaktadır (Yang ve diğ.,2013).

Dünya genelinde elektromekanik supap kontrol teknolojisi üzerine yatırımlar yapan otomotiv firmaları arasında Siemens, Renault, BMW, Delphi ve Sturman Industries gibi öncü kuruluşlar yer almaktadır. Siemens'in geliştirdiği sistemlerde enerji tüketimi, ses seviyesi ve güvenilirlik konuları üzerinde yoğunlaşılmıştır. Özellikle FEV'nin 2001 yılında geliştirdiği elektromekanik supap sisteminde, 6000 devir/dakikada 0,2 m/s kapanma hızı elde edilmiş ve sistemin enerji tüketiminin geleneksel sistemlerle karşılaştırılabilir seviyelere indirgenebileceği gösterilmiştir (Krauter ve diğ., 1992).

Değişken supap zamanlaması sayesinde, silindirlere alınan hava miktarı, gaz kelebeği konumundan bağımsız olarak doğrudan kontrol edilebilmekte, bu da gaz kelebeği kaynaklı pompalama kayıplarını azaltarak motorun genel verimliliğini artırmaktadır. Özellikle düşük motor devirlerinde daha erken kapanan emme supapları sayesinde tork artışı sağlanabilirken; yüksek devirlerde daha uzun supap açık kalma süreleriyle volümetrik verim artırılabilmektedir (Tuttle ve diğ., 1980). Aynı zamanda rölanti kararlılığı ve soğuk çalıştırma performansı da bu sistemler sayesinde iyileştirilebilmektedir.

Sonuç olarak, elektromekanik supap sistemleri, motor performansının artırılması, egzoz emisyonlarının düşürülmesi ve yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi gibi kritik hedefler doğrultusunda büyük potansiyel sunmaktadır. Bu sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi, içten yanmalı motor teknolojisinin geleceği açısından stratejik öneme sahiptir. Bu çerçevede yapılan tez çalışmasında, Kocaeli bölgesinde faaliyet gösteren otomotiv Ar-Ge merkezlerine teknik bir referans çerçevesi sunmayı ve yerli üretim stratejileriyle bütünleşik yüksek verimli supap kontrol sistemlerinin geliştirilmesini amaçlanmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

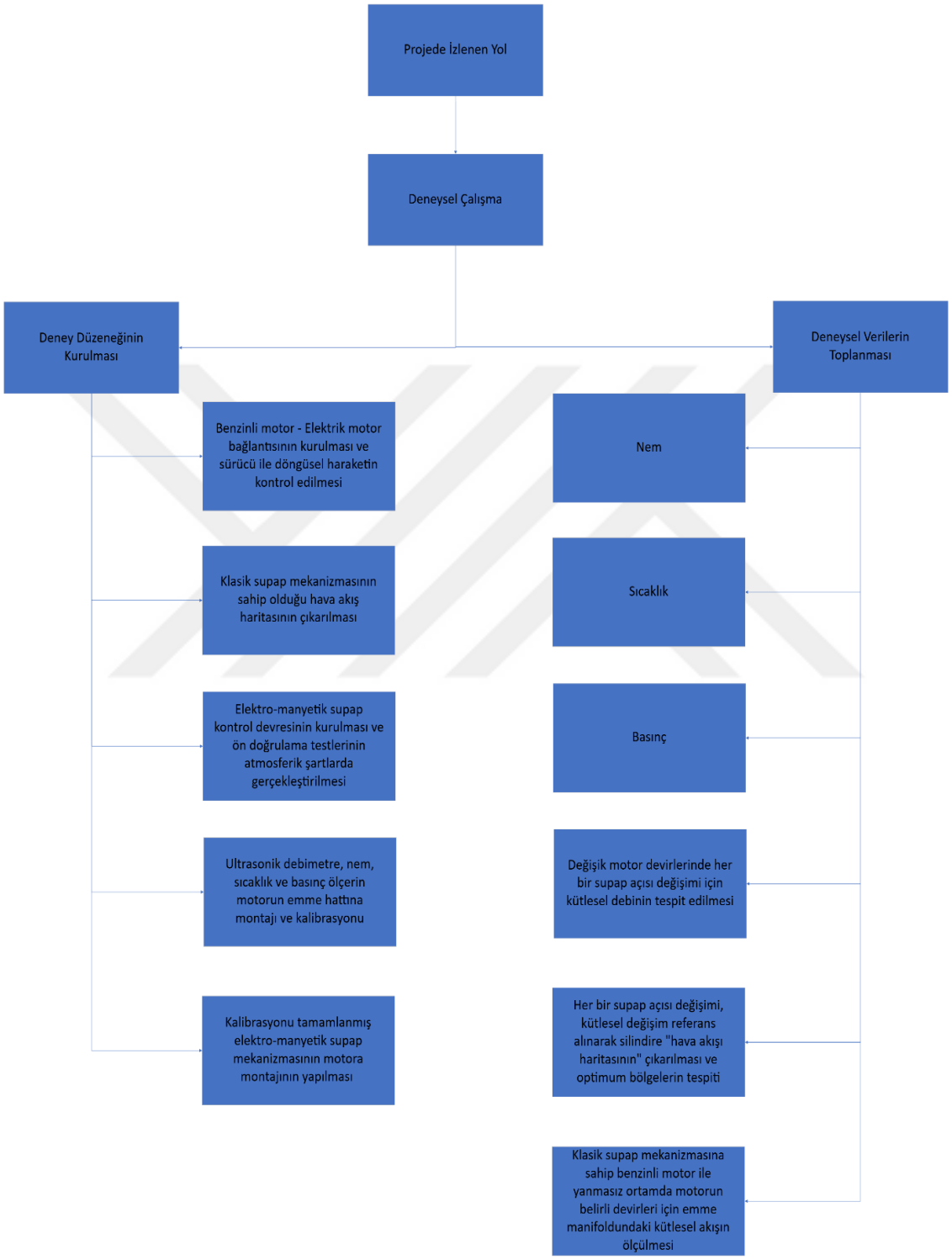
Bu tez çalışması kapsamında, elektromekanik supap mekanizmasına (ESM) yönelik özgün bir tasarım gerçekleştirilmiş; geliştirilen sistem, içten yanmalı tek silindirli bir motor üzerine entegre edilerek deneysel testler yürütülmüştür. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında, içten yanmalı motor ile bir elektrik motorunun senkronizasyonu sağlanmış ve bu iki sistem arasındaki mekanik bağlantı uygun kaplinler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Elektrik motorunun tahrik sistemine bağlanan sürücü, motorun dönme hızını hassas bir şekilde yönetebilecek şekilde yapılandırılmıştır.

Test düzeneği kurulum sürecinin devamında, motorun sabitlendiği test sehpası üzerine gerekli sensör ve ölçüm birimlerinin montajı gerçekleştirilmiştir. Emme hattına entegre edilen ultrasonik debimetre (AVL Flowsonic) sayesinde hava debisi yüksek hassasiyetle ölçülmüş; aynı hatta yerleştirilen sıcaklık, bağıl nem ve basınç sensörleri aracılığıyla ortamdaki termodinamik değişkenler veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. İlgili tüm ölçüm aygıtları, deney öncesi kalibrasyon prosedürleri tamamlanarak doğruluk sınırları içerisinde çalışacak biçimde ayarlanmıştır. Böylece sistem, deneysel veri toplama sürecine hazır duruma getirilmiştir.

Bu süreçle eş zamanlı olarak, farklı geometrik konfigürasyonlarda birden fazla elektromekanik supap prototipi tasarlanmış ve laboratuvar ortamında imalatları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan her bir ESM prototipi için ayrı ayrı performans ön değerlendirmeleri yapılmış ve ilk doğrulama testleri tamamlanmıştır. Elektromekanik supapların sürülmesini sağlayan kontrol devresi, donanım ve yazılım bileşenleriyle birlikte özel olarak geliştirilmiş; PWM tabanlı gerilim kontrollü sürücüler kullanılarak sistemin doğrusal olmayan tepki davranışlarına uygun bir kontrol altyapısı oluşturulmuştur.

Deneylerde kullanılmak üzere seçilen benzinli motorun orijinal supap zamanlama mekanizması tamamen sökülmüş ve bunun yerine elektromekanik prensiplerle çalışan ESM sistemi yerleştirilmiştir. Yeni sistemin montajı sırasında hem mekanik hem elektriksel entegrasyonun sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilmesi adına özel bağlantı parçaları ve yalıtım çözümleri geliştirilmiştir. Sistem mekanik sistemin motorla tam uyumlu çalıştığı çeşitli deneylerle doğrulanmış ve elde edilen ilk veriler doğrultusunda

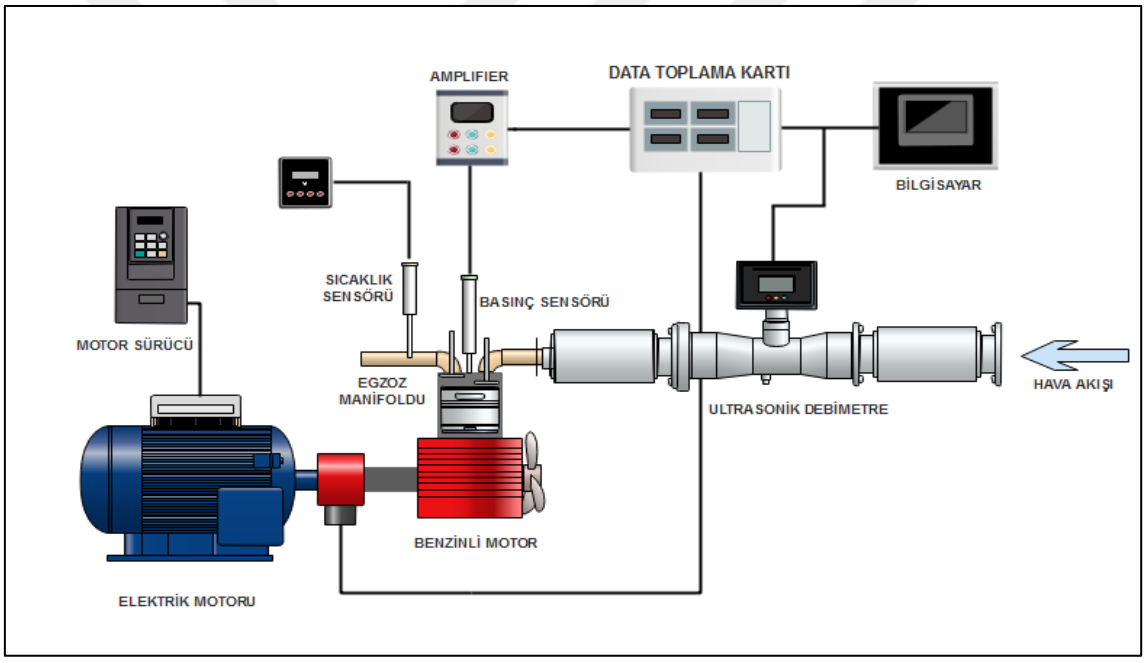
sistem nihai testlere hazır hale getirilmiştir. Ayrıca çalışmanın akış şeması da Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1.Tez çalışması akış diyagramı

3.1. Deney Düzeneği Bileşenleri

Bu bölümde, deney sistemini oluşturan temel bileşenler tanıtılmış; deney düzeneğinin kurulumu, supap mekanizmasının tasarımı ve sistemle entegrasyonu kapsamlı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca, tasarımı tamamlanmış olan Elektromekanik Supap Mekanizması (ESM) ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan deney düzeneği; dört zamanlı, tek silindirli bir benzinli motor, elektrik motoru ve bu motora ait sürücü devresi, elektromekanik supap mekanizması, elektronik kontrol kartı, bobin sürücü kartı, güç kaynağı, enkoder, silindir içi basınç sensörü ve üst ölü nokta (ÜÖN) konum sensörü olmak üzere çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Deney sisteminin genel yapısını ve bileşenler arası ilişkiyi gösteren prensip şeması Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.2.Deney düzeneğinin şeması

Deney düzeneğinde tahrik elemanı olarak kullanılan tek silindirli, dört zamanlı benzinli motorun döndürülmesi amacıyla, bir elektrik motoru tercih edilmiş ve bu motor, kaplin aracılığıyla doğrudan motorun krank miline bağlanmıştır. Bu bağlantı sayesinde, sistemin senkron ve kontrollü bir şekilde çalışması sağlanmıştır. Elektrik motoru ile içten yanmalı motor arasındaki bu mekanik bağlantı, test sırasında motorun çeşitli devirlerde kararlı biçimde çalıştırılmasına olanak tanımaktadır. Kurulumun güvenli ve stabil bir şekilde

gerçekleştirilebilmesi için hem benzinli motor hem de elektrik motoru sağlam bir test sehpası üzerine sabitlenmiştir.

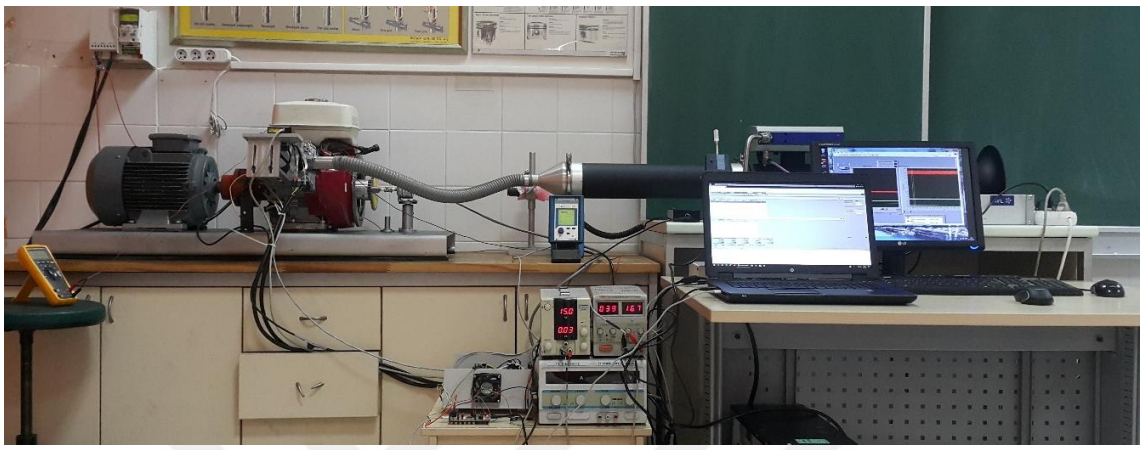
Elektrik motorunun sürülmesi ve hız kontrolünün sağlanması amacıyla ABB marka, 11 kW gücünde bir motor sürücüsü kullanılmıştır. Bu sürücü, motorun moment ve devir sayısı gibi parametrelerinin hassas biçimde kontrol edilmesini mümkün kılarak deneysel verilerin doğruluğuna katkı sağlamaktadır. Sistemden krank açısı bilgisinin alınabilmesi amacıyla, benzinli motorun krank mili çıkışına yüksek çözünürlüklü bir enkoder yerleştirilmiştir. Bu enkoder, krank milinin dönme hareketini sayısal verilere dönüştürerek, kontrol sisteminin zamanlama ve pozisyonlama açısından hassas çalışmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, motor içi hareketlerin referans noktası olan üst ölü nokta (ÜÖN) konumunun tespit edilebilmesi için, ÜÖN sensörü devreye alınmıştır. Bu sensör, deney sisteminde zamanlama ve ateşleme gibi süreçlerin referans alacağı kritik veriyi sağlayarak kontrol algoritmalarının doğruluğunu artırmaktadır. Sensörün doğru çalışması için önceden kalibrasyonu yapılmış ve motorlar arasındaki bağlantı bölgesine entegre edilmiştir.

Elektromekanik Supap Mekanizmasının (ESM) içten yanmalı motora montajı öncesinde, mevcut kam mili ve silindir kapağı yapısı sistemden demonte edilmiştir. Bu işlem, ESM'nin doğrudan supaplara müdahale edebilmesini sağlamak adına gereklidir. Ardından, motorun silindir kapağı geometrisine ve supap yerleşimine uygun olarak özel bir ESM tasarımı gerçekleştirilmiş; bu mekanizma, motorla mekanik ve geometrik uyumluluk gösterecek şekilde yataklanarak silindir kapağına entegre edilmiştir.

Tüm bu bileşenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan deney düzeneği hem mekanik hem de elektronik olarak tam bir entegrasyon içinde çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. Deney sisteminin genel görünümü ve bileşenlerin yerleşimi Şekil 3.3’de görsel olarak sunulmaktadır. Bu yapı, ESM'nin performansının gerçek motor koşullarında test edilmesini mümkün kılmakta ve geliştirme sürecinde güvenilir deneysel veri sağlamaktadır. Bu deney düzeneği, ESM’nin performansının gerçek motor koşullarına benzer şartlarda test edilmesini mümkün kılmakta ve elde edilen sonuçların hem güvenilir hem de tekrarlanabilir olmasını sağlamaktadır. Böylece, supap hareket profilleri, dinamik tepki süreleri, enerji tüketimi ve sistem verimliliği gibi kritik parametreler doğrudan

deneysel olarak ölçülebilmektedir. Sonuç olarak, deney sistemi yalnızca teorik modellerin doğrulanmasına hizmet etmekle kalmayıp, aynı zamanda ESM'nin pratik uygulanabilirliğini ve motor teknolojilerine entegrasyon potansiyelini ortaya koymaktadır.



Şekil 3.3. Deney düzeneği

3.1.1. Tek Silindirli Benzinli Motor

Deneysel çalışmalar kapsamında, içten yanmalı motor olarak Honda GX 390 model, dört zamanlı ve tek silindirli bir benzinli motor tercih edilmiştir. Elektromekanik Supap Mekanizmasının (ESM) bu motora entegrasyonu amacıyla, motorun orijinal silindir kapağı ile supap kumanda mekanizması sistemden demonte edilmiştir. Ardından, ESM'nin montajına olanak sağlayacak şekilde, silindir kapağı üzerinde gerekli mekanik adaptasyonlar gerçekleştirilerek mekanizma motor üzerine başarıyla entegre edilmiştir.

Motorun kontrollü bir şekilde çalıştırılabilmesi için, test düzeneğinde kullanılan benzinli motor bir kaplin aracılığıyla harici bir elektrik motoruna bağlanmıştır. Bu bağlantı sayesinde sistem, farklı devir ve yük koşullarında senkronize bir biçimde çalıştırılabilmektedir. Deneylerde kullanılan test motoruna ait temel teknik özellikler Tablo 3.1'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Honda GX 390 motorunun tercih edilmesinin temel nedeni, tek silindirli yapısının deneysel modifikasyonlara ve özel mekanizma entegrasyonlarına elverişli olmasıdır. Ayrıca, bu motor tipi hem kompakt tasarımı hem de yaygın kullanımı sayesinde laboratuvar koşullarında yapılan deneyler için uygun bir test platformu sağlamaktadır.

Tablo 3.1.Test motorunun teknik özellikleri

Motor	Honda GX390
Motor Tipi	4 zamanlı-üstten valfli-tek silindirli-yatay şaft
Çap x Strok değeri	88 x 64 mm
Silindir hacmi	389 cm³
Sıkıştırma oranı	8:1
Maksimum güç	9,7 kW @ 3600 dev/dk
Maksimum tork	2,7 kgm @ 2500 dev/dk
Ateşleme sistemi	Elektronik ateşlemeli
Çalıştırma sistemi	Otomatik mekanizmalı / Elektrik marşlı
Soğutma sistemi	Hava soğutmalı

3.1.2. Elektrik Motoru

Test motorunun tahrikini sağlamak amacıyla, bölüm laboratuvarında mevcut olan GAMAK marka bir elektrik motoru kullanılmıştır. Bu motor, içten yanmalı motorun kontrollü ve senkronize bir biçimde çalıştırılmasına olanak tanımaktadır.

Elektrik motorunun hız ve moment kontrolü ise ABB marka, 11 kW gücünde bir motor sürücüsü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu motor sürücüsü, geniş kontrol parametrelerine sahip olması sayesinde sistemin dinamik ihtiyaçlarına uygun bir çalışma ortamı sunmaktadır. Özellikle ani hız değişimlerinin gerektiği durumlarda hızlı tepki verebilmesi ve moment karakteristiğinin hassas biçimde ayarlanabilmesi, deneylerde elde edilen verilerin doğruluğunu artıran önemli bir faktör olmuştur. Ayrıca, motor sürücüsünün sağladığı koruma mekanizmaları, aşırı akım, gerilim dalgalanmaları veya sistemde oluşabilecek ani yük değişimlerine karşı düzenek güvenliğini artırmıştır

Bu sürücü, motorun kararlı çalışmasını sağlayarak deney koşullarının güvenilirliğini artırmaktadır. Deneylerde kullanılan elektrik motoruna ait temel teknik özellikler Tablo 3.2'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 3.2.Elektrik motoru teknik özellikleri

Giriş gerilimi	380 V
Frekans	50 Hz
Hız	2960 dev/dk
Güç	11 kW

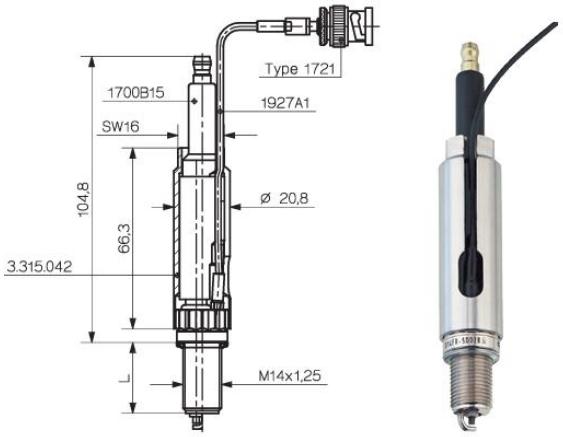
3.1.3. Silindir Basınç Sensörü

Bu tez çalışmasının önemli parametrelerinden biri de silindir içerisindeki basıncın ölçülmesi ve değerlendirilmesidir. Bu çalışmada benzinli motorun bujisi çıkarılmış yerine Kistler 6117BFD17 marka silindir basınç sensörü takılmıştır. Gelişmiş yakıt sistemleri, yanma modellemeleri ve performans/emme optimizasyonlarında yüksek çözünürlüklü veri sağlayarak hem akademik hem endüstriyel düzeyde ileri yanma analizi yapılmasına olanak tanır.

Silindir Basınç sensörleri genellikle piezoelektrik prensibe göre çalışır. Bu prensipte:

- Basınç, sensör üzerindeki kuvars veya turmalin gibi piezoelektrik kristal malzemeye uygulandığında, kristal üzerinde yük (elektriksel sinyal) oluşur.
- Bu yük, bir yük yükseltici (amplifier) aracılığıyla ölçülür ve voltaja dönüştürülür.
- Dönüştürülen bu sinyal, silindir içi basınç eğrisinin (*p-θ veya p-V eğrisi*) elde edilmesinde kullanılır.

Piezoelektrik sensörler, çok yüksek zaman çözünürlüğü (örneğin <0.1 krank açısı) sunarak yanma başlangıcı, maksimum basınç açısı, ısıl verim gibi kritik analizlerin yapılmasına olanak tanır. Piezoelektrik sensörlerin sunduğu bu yüksek ölçüm hassasiyeti sayesinde, silindir içi basınç eğrileri gerçek zamanlı olarak kaydedilmekte ve bu eğriler üzerinden ısı salınımı analizi, yanma süresi tayini ve volümetrik verim hesaplamaları gibi ileri düzey değerlendirmeler yapılabilmektedir. Böylelikle, motorun hem enerji verimliliği hem de emisyon karakteristikleri hakkında güvenilir sonuçlar elde edilmekte, farklı kontrol stratejilerinin veya supap mekanizmalarının performansa etkisi detaylı biçimde incelenebilmektedir. Şekil 3.4'de silindir basınç sensörü gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kistler Silindir Basınç Sensörü

3.1.4. Kontrol Kartı ve Sürücü Devresi

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen Elektromekanik Supap Mekanizması sisteminin kontrol altyapısı, STM32F4 serisi mikrodenetleyici tabanlı özel bir kontrol kartı ile sağlanmıştır. Kontrol kartı, motorun krank mili konumunu yüksek çözünürlükle belirleyen enkoder ve Üst Ölü Nokta (ÜÖN) sensörlerinden elde edilen geri besleme verilerini işleyerek, valf kontrolü için gerekli olan akım sürücü devresine uygun sinyalleri üretmek üzere yazılımsal olarak yapılandırılmıştır.

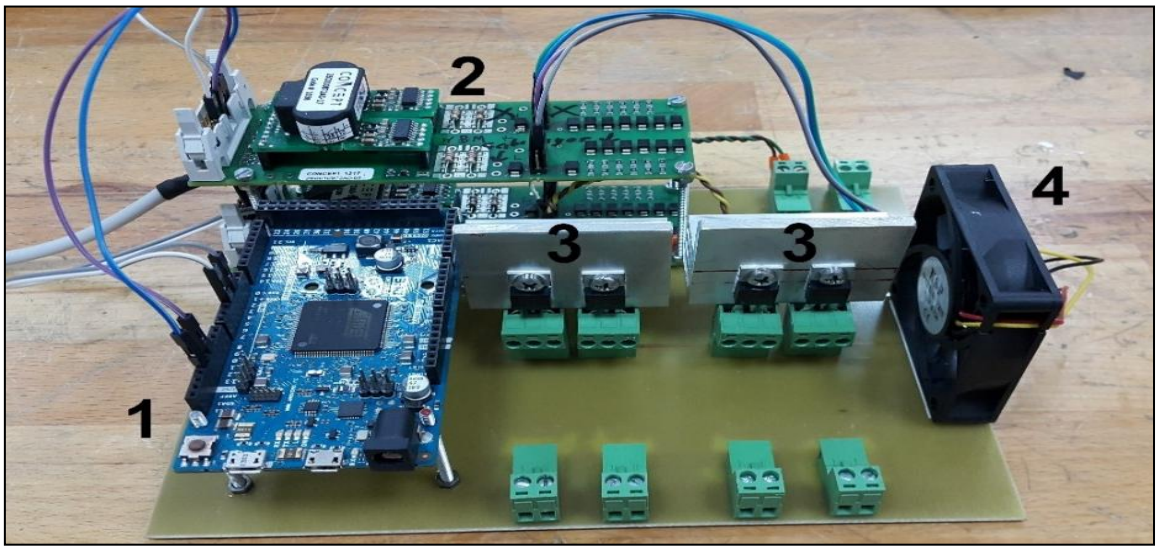
Geliştirilen yazılım sayesinde, kontrol kartı, enkoderden aldığı anlık krank mili açı bilgisini değerlendirmekte ve bu bilgiye dayalı olarak MOSFET tabanlı sürücü devresine PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyalleri üretmektedir. Böylece, MOSFET anahtarlama elemanlarının iletime geçmesi sağlanarak elektromanyetik aktüatöre gerekli akım aktarımı gerçekleştirilmekte, supap hareketi hassas bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

Bu yapı sayesinde sistem, krank mili konumuna senkron çalışan, zamanlaması yüksek doğrulukla ayarlanabilen ve gerçek zamanlı kontrol stratejilerine olanak sağlayan bir kontrol mimarisi kazanmıştır.

MOSFET'ler üzerinden bobinlere yönlendirilen akım ile elektromanyetik kuvvet üretilmekte, bu kuvvetin etkisiyle hareketli nüve (disk) çekilerek ilgili emme ya da egzoz supabının açılıp kapanması sağlanmaktadır. Sistemin farklı senaryolarda test edilmesini

mümkün kılmak adına bilgisayar tabanlı bir arayüz geliştirilmiş ve bu arayüz üzerinden emme ve egzoz supaplarının açılma/kapanma zamanları ayarlanabilir hale getirilmiştir. Deneysel çalışmalarda çeşitli gerilim değerleri (18–24 V) altında farklı valf zamanlamaları denenmiş ve bu esnada bobinlerin enerji ihtiyacı 30V–50A kapasiteli bir güç kaynağı ile karşılanmıştır.

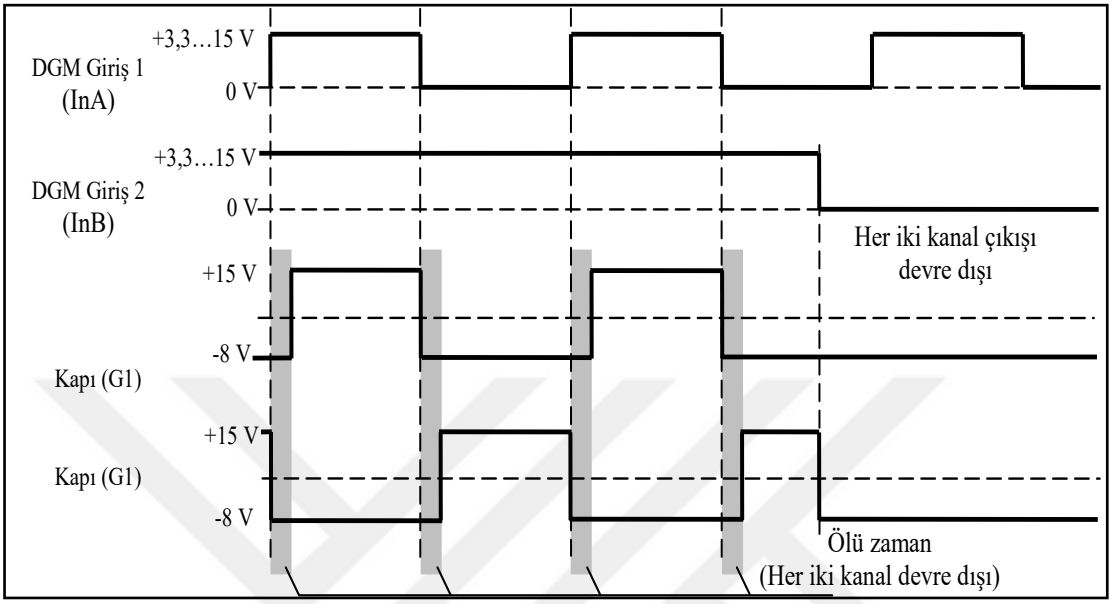
Ayrıca, ESM sisteminde bobinlerin kontrollü şekilde sürülmesi amacıyla özel olarak tasarlanmış bir MOSFET sürücü devresi kullanılmıştır. Tüm kontrol ve sürücü bileşenlerinin bağlantı düzeni ve yerleşimi Şekil 3.5Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. ESM sürücü ve kontrol devreleri (1. Kontrol Kartı, 2. Mosfet Sürücü Kartı, 3. IRFZ 540 Mosfet, 4. Fan)

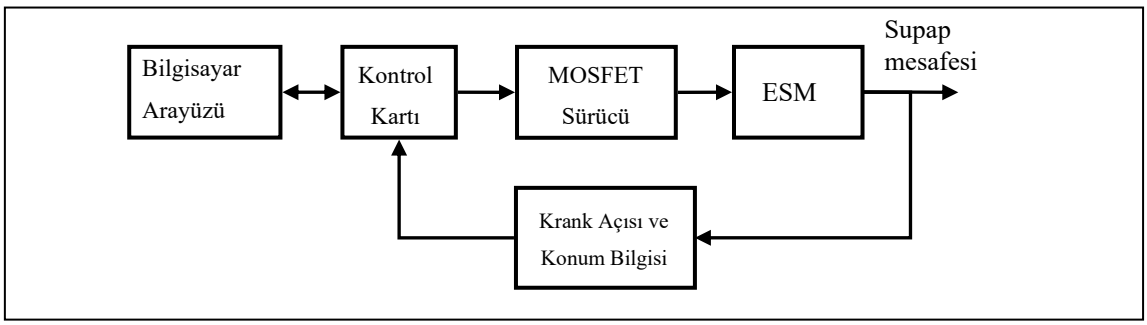
Kontrol sistemi tarafından oluşturulan anahtarlama sinyallerinin MOSFET'leri etkin biçimde sürmesi amacıyla bu çalışmada iki adet 2 kanallı sürücü modül (CONCEPT 2SC0108T) kullanılmıştır. MOSFET sürücüler, doğrudan (direct mode) modunda çalıştırılmış olup, her bir kanal aynı kolda yer alan MOSFET'ler için gerekli anahtarlama sinyallerini üretmiştir. Söz konusu sürücü modülleri, CONCEPT firmasına ait 2BB0108T model geliştirme kartları aracılığıyla entegre edilmiştir. Bu kartlar, 1200V seviyesinde çok kanallı çıkışlara sahip olup, MOSFET'lerin güvenli ve kararlı biçimde çalışabilmesini sağlayacak koruma mekanizmalarını da içermektedir. Geliştirme platformları; aşırı akım koruması, hata algılandığında otomatik kapama, yarım köprü konfigürasyonlarında ölü zaman üretimi ve tak-çalıştır (plug-and-play) gibi özelliklerle

donatılmıştır. Bu özellikler, sistemin güvenilirliği ve dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir. MOSFET sürücü devrelerine ait kontrol sinyallerinin zamana bağlı davranışı ve işleyişi Şekil 3.6'da ayrıntılı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.6. Mosfet sürücü kontrol sinyalleri

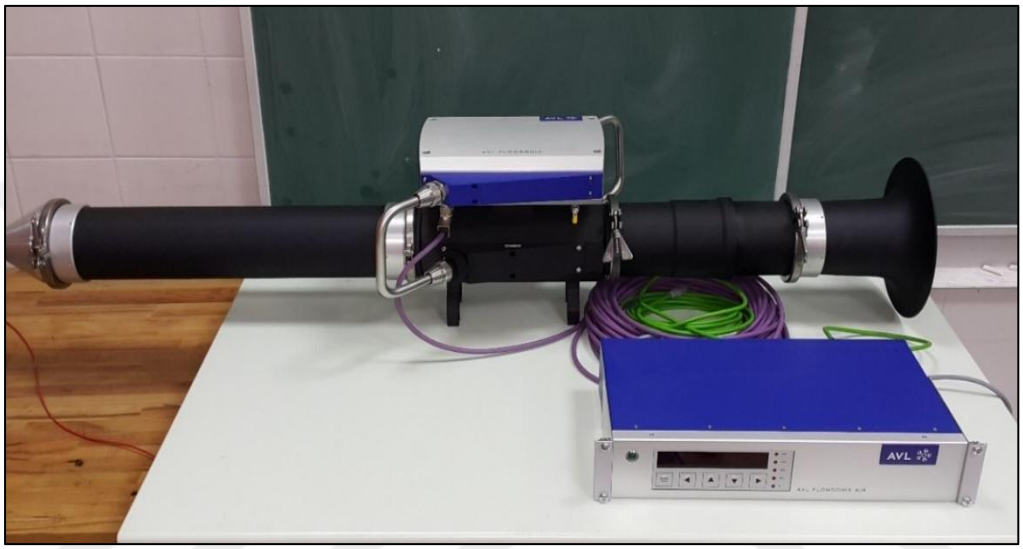
Elektromanyetik supap mekanizmasında (ESM), sistemin çalışmasını yöneten kontrol kartı; enkoder ve üst ölü nokta (ÜÖN) sensörlerinden elde edilen açı verilerini işleyerek MOSFET sürücü kartlarına darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyalleri göndermektedir. Bu PWM sinyalleri doğrultusunda sürücü kartları, MOSFET'leri iletime geçirerek ilgili bobinleri enerjilendirmekte ve böylece elektromanyetik kuvvetin oluşmasını sağlamaktadır. Bu kuvvet, hareketli nüveyi çekerek supapların açılmasını veya serbest bırakarak kapanmasını gerçekleştirmektedir. Sistemin genel işleyiş yapısı ve kontrol süreçlerini açıklayan blok diyagram Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. ESM kontrol blok diyagramı

3.1.5. Ultrasonik Debimetre AVL Flowsonic

Bu çalışmada emme manifoltundan silindir içerisine alınan havanın debisini ölçmek için AVL Flowsonic 100 Ultrasonik debimetresi kullanılmıştır. Bu debimetre motorun emme manifoltuna uygun şekilde montajı yapılmış ve silindir içine alınan hava miktarı belirli devirlerde ölçülmüştür. Şekil 3.8'de deney düzeneğine yerleştirilmiş olan hava kütle ölçer (AVL Flowsonic 100) gösterilmiştir.

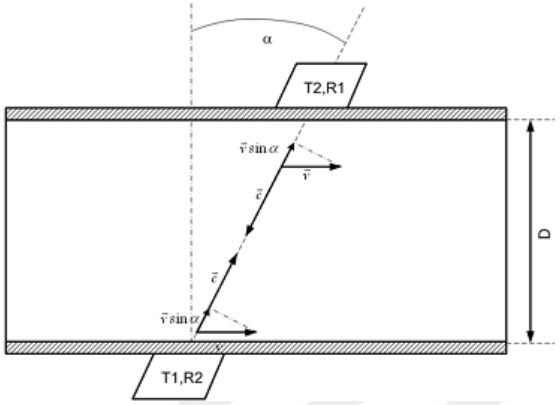


Şekil 3.8. AVL Flowsonic 100 Ultrasonic Debimetre

Ultrasonik debimetrenin çalışma prensibi, akışkanın içerisinden geçen ultrasonik dalgaların yol alma sürelerindeki farklılıkların ölçülmesine dayanmaktadır. Cihazın içinde, karşılıklı konumlandırılmış iki verici (T1, T2) ve iki alıcı (R1, R2) bulunmaktadır. Bu vericiler, akışkanın hareket yönüne paralel ve ters yönde ultrasonik sinyaller göndermektedir. Akış yönünde ilerleyen ultrasonik dalga, akışa karşı hareket eden dalgaya kıyasla alıcıya daha kısa sürede ulaşır. Örneğin, akış yönünde gönderilen sinyal R1 alıcısına daha hızlı ulaşırken, karşı yönde gönderilen sinyalin R2 alıcısına ulaşması daha uzun sürer.

Bu iki sinyal arasındaki zaman farkı, cihazın dahili algoritmaları tarafından hesaplanarak akışkanın hız bilgisi elde edilir. Elde edilen zaman farkı, akışkanın debisini belirlemek için matematiksel olarak işlenir ve böylece cihaz akış miktarını doğru şekilde ölçer.

Ultrasonik debimetrenin yapısal konfigürasyonu ve bileşen yerleşimi Şekil 3.9'da ve aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Ultrasonik debimetrenin yapısı

T1'den R1'e hareket eden sinyal süresi Denklem (3.1)'de gösterilmiştir.

$$t_{up} = \frac{D}{sin\propto} * \frac{1}{(c+v*cos\propto)} \tag{3.1}$$

T2'den R2'ye hareket eden sinyal süresi Denklem (3.2)'de,

$$t_{down} = \frac{D}{sin\propto} * \frac{1}{(c-v*cos\propto)} \tag{3.2}$$

2 sinyal arasındaki zaman farkı da Denklem (3.3) ve Denklem (3.4)'de açıklanmıştır.

$$\Delta t = t_{down} - t_{up} = v * \frac{t_{down}*t_{up}*sin(2\propto)}{D} \tag{3.3}$$

$$v = \frac{D}{sin(2\propto)} * \frac{t_{down}-t_{up}}{t_{down}*t_{up}} \tag{3.4}$$

Ortalama akış hızına bağlı olarak debi Denklem (3.5) , (3.6) (3.7)'den ($\dot{v}_a$) , ($\dot{m}_a$) hesaplanır;

$$\dot{v}_a = v * A = v * \pi * \frac{D^2}{4} \tag{3.5}$$

$$\dot{v}_a = \frac{\pi * D^3}{4 * \sin(2\alpha)} * \frac{t_{down} - t_{up}}{t_{down} * t_{up}} \tag{3.6}$$

$$\dot{m}_a = \frac{P_a}{RT_a} * \dot{v}_a \tag{3.7}$$

Bunlara ek olarak, ultrasonik sinyal hızı Denklem (3.8) ile belirlenmektedir:

$$\sum t = t_{down} + t_{up} = \frac{1}{c} * \frac{2 * D}{sin\propto} \quad , \quad c = \frac{2 * D}{sin\propto} * \frac{1}{t_{down} + t_{up}} \tag{3.8}$$

3.2. Elektromekanik Supap Mekanizması Tasarımı ve Prototip İmalatı

Elektromekanik supap (ESM) sistemlerinin tasarımında dikkate alınması gereken çeşitli kritik parametreler bulunmaktadır. Selenoid bobin içerisinden geçen elektrik akımı, bir elektromıknatıs oluşturarak hareketli demir çekirdeği bobin eksenine doğru çeker. Bu bağlamda, elektromıknatısın manyetik alan çizgileri birbiriyle kesişmeyip, manyetik direncin en düşük olduğu yolu izleyerek net bir çekme veya itme kuvveti meydana getirir. Söz konusu manyetik akı çizgileri, bobinin kuzey (N) kutbundan çıkıp güney (S) kutbuna doğru yönelir. Bobin tarafından üretilen çekme kuvveti, genellikle amper-sarım sayısının çarpımı ile tanımlanan manyeto motor kuvvet (MMF) üzerinden ifade edilir. Selenoid bobinin etkin bir şekilde çalışabilmesi için, hareketli parçanın (çekirdeğin) yer değiştirme mesafesi, çekirdek yarıçapını aşmamalıdır.

Tez kapsamında üç farklı elektromekanik supap (ESM) prototipi geliştirilmiştir. Bu prototiplerden birincisinde, supap mekanizması elektromanyetik kuvvet etkisiyle açılmakta ve yay kuvveti aracılığıyla kapanmaktadır. Bu tür bir sistemde, elektromanyetik kuvvetin; sistemde yer alan yay kuvvetini ve ayrıca karşılaşılan diğer direnç kuvvetlerini yenebilecek düzeyde olması gerekmektedir. Dolayısıyla, mıknatıs devresinin boyutlandırılması, bu kuvvet gereksinimlerine göre optimize edilmelidir. Aynı zamanda, bu elektromanyetik kuvvetin; yay kuvvetine ek olarak, egzoz ve emme manifoltları ile silindir arasında oluşan basınç farklarının doğurduğu değişken gaz kuvvetlerine de karşı koyabilecek büyüklükte olması beklenir. Kullanılacak elektromıknatısın geometrik boyutları ise, silindir kapağı üzerinde mevcut olan fiziksel alanla uyumlu şekilde tasarlanmalıdır. Bu türden çoklu tasarım kısıtları, elektromıknatıs tasarımında yüksek düzeyde hassasiyet gerektirmektedir. Sonuç olarak, geliştirilen **1.Tip**

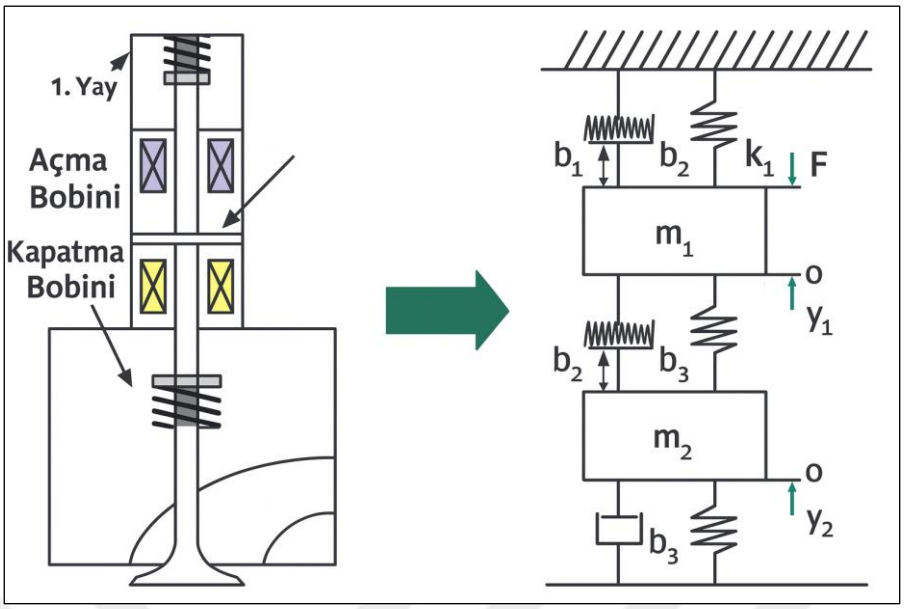
ESM prototipi tek bobin ve yaylı sitem, hedeflenen optimum çalışma koşullarını sağlayamadığı için sonraki ESM tasarımlarına yönelinmiştir.

3.2.1. ESM Tasarımı ve Tasarım Parametreleri

Yukarıda belirtilen nedenlerle bobin tasarımında iyileştirme ihtiyacı doğmuş ve bu doğrultuda çeşitli alternatif tasarımlar geliştirilmiştir. Bu nedenle, farklı geometrik yapılar (konik piston, düz yüzeyli silindirik ve omuzlu silindirik yapı), çeşitli sarım sayıları ve tel çaplarına sahip üç farklı bobin tasarımı ele alınmış ve detaylı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yeni geliştirilen elektromekanik supap mekanizmaları (2, 3A ve 3B tipi ESM modelleri), belirlenen tasarım parametreleri çerçevesinde Flux simülasyon yazılımı kullanılarak değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, 3A tipi modelin en uygun bobin tasarımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Elektromanyetik sistemin performansını etkileyen başlıca parametreler arasında manyetik devre ölçüleri, hareketli elemanın geometrisi ve kütlesi, bobin sarım sayısı, tel çapı ve sistemin endüktansı yer almaktadır. Bu nedenle, optimum bir elektromekanik supap tasarımı elde edebilmek için söz konusu parametrelerin her biri özenle belirlenmeli ve sistem gereksinimlerine uygun şekilde optimize edilmelidir. Geliştirilen modellerde bu parametreler sistematik biçimde değiştirilerek ideal tasarım koşulları elde edilmeye çalışılmıştır.

Sistemin dinamik davranışı, yay-kütle-sönümleyici (damper) modeli temel alınarak matematiksel olarak temsil edilebilmektedir. Bu yaklaşımda, elektromekanik supap sisteminin hareketli elemanı (örneğin mil ve disk), bir kütle olarak modellenirken; sisteme etki eden geri yay kuvveti (elastik kuvvet), enerji kayıplarını temsil eden ise sönümleyici (viskoz direnç) olarak ifade edilir. Şekil 3.10'da elektromekanik supap mekanizmasının bu dinamik yapısı şematik olarak sunulmaktadır. Kütle, yay ve sönümleyici bileşenlerin sistem üzerindeki etkileri görsel olarak gösterilmektedir. Bu yapı dikkate alınarak türetilen hareket denklemleri, aşağıda ayrıntılı biçimde verilmiştir. Söz konusu diferansiyel denklemler, elektromanyetik kuvvet, yay kuvveti, sönüm kuvveti ve atalet kuvveti arasındaki dengeyi ifade etmekte olup, sistemin zamana bağlı davranışının analiz edilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 3.10. ESM'nin dinamik modeli

Sistemin matematiksel modeli Denklem (3.9)'da verilmiştir.

$$F_m = m\frac{d^2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + F_{yay} + F_b \tag{3.9}$$

Burada;

m : hareketli kütle$[kg]$

b : sönüm katsayısı$[N/(m/s)]$

F_m : mıknatıs çekme kuvveti $[N]$

F_{yay} : yay kuvveti $[N]$

F_b : basınç kuvvetidir $[N]$.

Manyetik devre içerisinde kullanılan bir bobin, belirli bir ortalama manyetik yol uzunluğuna (l) ve kesit alanına (A) sahiptir. Bobin sarımlarından geçen elektrik akımı (I), selenoid yapı içerisinde manyetik kuvvet çizgileri oluşturarak bir manyetik akı meydana getirir. Bu çizgilerin birim alandan geçişine manyetik akı yoğunluğu denir ve birimi *Weber/metrekare* (Wb/m²) ya da SI birim sistemiyle ifade edildiğinde *Tesla (T)* olarak tanımlanır. Burada, N bobin üzerindeki sarım sayısını temsil etmektedir. Oluşan manyetik akı yoğunluğu (B), Denklem 3.10'da verilmiştir.

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l} \tag{3.10}$$

Endüktans, bir elektrik devresinin fiziksel yapısını ve manyetik karakteristiğini tanımlayan temel bir elektromanyetik parametredir. Bu büyüklük genellikle *L* harfi ile sembolize edilir ve SI birim sisteminde birimi *Henry (H)* olarak ifade edilir. Denklem (3.11)'de endüktans, *L;*

$$L = \frac{\Psi}{I} \tag{3.11}$$

Şeklinde ifade edilir. Manyetik alan çizgilerinin yalnızca bobin içerisinde yer aldığı varsayımı altında, manyetik devreyi oluşturan ferromanyetik malzeme içerisinde, bir sarım üzerinden geçen manyetik akı, toplam manyetik akının sarım sayısına bölünmesiyle elde edilir. Bu durumda, her bir sarım için söz konusu olan manyetik akı, bobin ile manyetik çekirdek arasındaki manyetik bağın bir göstergesi olarak değerlendirilir. Denklem (3.12)'de Φ *;*

$$\Phi = BA \tag{3.12}$$

Şeklinde ifade edilir ve birimi Weber'dir. Denklem 3.11, denklem 3.12'de yerine yazılırsa tek sarımdan akan manyetik akı Denklem (3.13)'teki gibi ifade edilir.

$$\Phi = \mu_0 \frac{NI}{l} A \tag{3.13}$$

Bobinin toplam akısı ise Ψ Denklem (3.14)'de verilmiştir.

$$\Psi = N\Phi \tag{3.14}$$

Olarak ifade edilir. Denklem 3.13, denklem 3.14'de yerine yazılırsa bobinin toplam akısı;

$$\Psi = N^2 \frac{\mu_0 A}{l} I \tag{3.15}$$

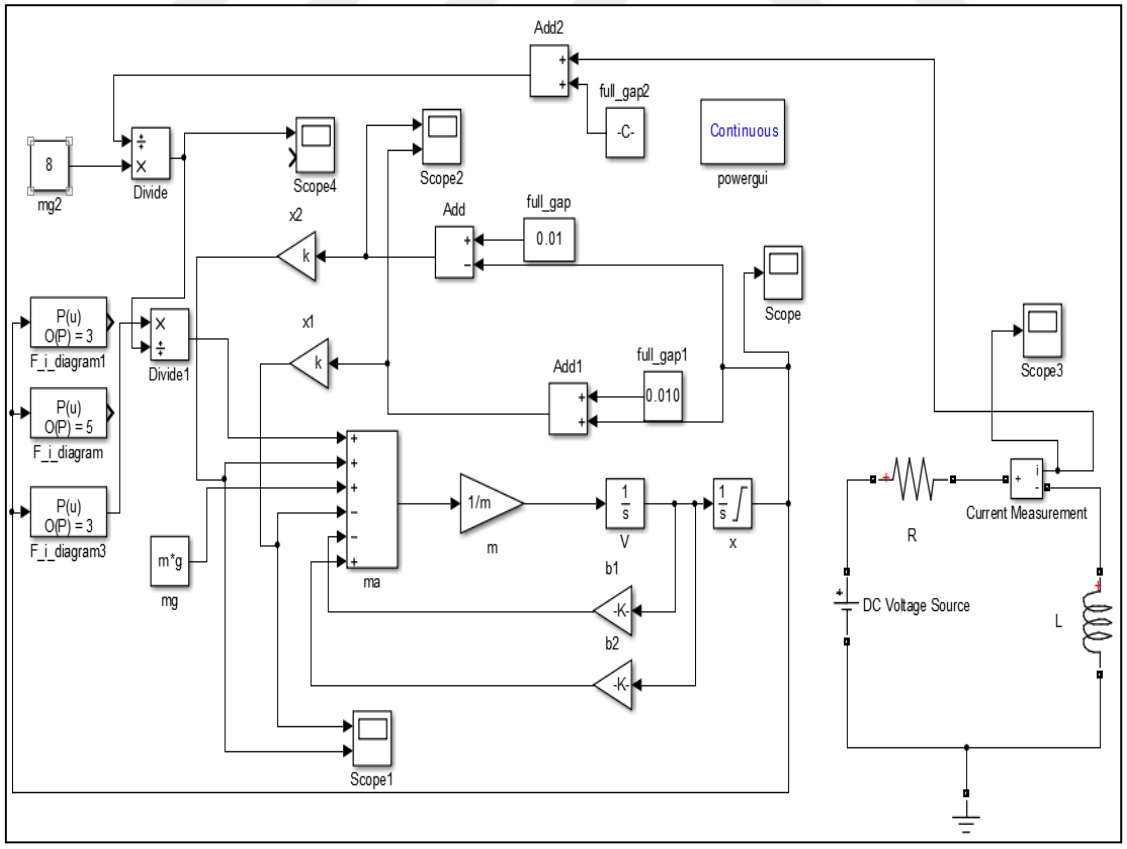
Denklem (3.15)'deki gibi yazılabilir.

Elektromanyetik sistemlerin tasarımında, manyetik alanın etki alanında bulunan manyetik bir parçayı kendisine doğru çekme kuvveti, Denklem 3.15'ten yararlanılarak hesaplanmaktadır. Bu kuvvet, sistemin hava aralığı içerisindeki manyetik enerji değişimine dayalı olarak belirlenir. İlgili teorik temelde, manyetik alanın enerji

yoğunluğu ve hava aralığındaki değişimi dikkate alınarak Denklem (3.16)'daki çekme kuvveti elde edilir.

$$F = -\frac{B^2 A}{2\mu_0} \tag{3.16}$$

Sistemin dinamik davranışlarını analiz edebilmek amacıyla, ilgili matematiksel denklemler temel alınarak elektromekanik supap (ESM) sistemine ait bir model, Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Bu modelde, elektromanyetik kuvvet, yay kuvveti, sönümleme etkisi ve hareketli elemanın kütlesine dayalı olarak geliştirilen diferansiyel denklemler kullanılarak sistemin zamanla değişen davranışları simüle edilmiştir. Modelleme sürecinde, daha önce tanımlanan yay-kütle-sönümleyici sistemi ve elektromanyetik kuvvet denklemleri birlikte ele alınarak, supap konumu, hızı ve ivmesi gibi değişkenlerin zamana bağlı değişimleri gözlemlenmiştir. Matlab/Simulink platformu, bu tür çok girişli çok çıkışlı sistemlerin zamana bağlı dinamik analizlerini gerçekleştirmek için uygun bir ortam sunmakta ve farklı çalışma senaryoları için hızlı bir biçimde simülasyon yapılmasına olanak tanımaktadır. Şekil 3.11'de sistemin Simulink modeli verilmiştir.



Şekil 3.11. Sistemin MATLAB/Simulink Modeli

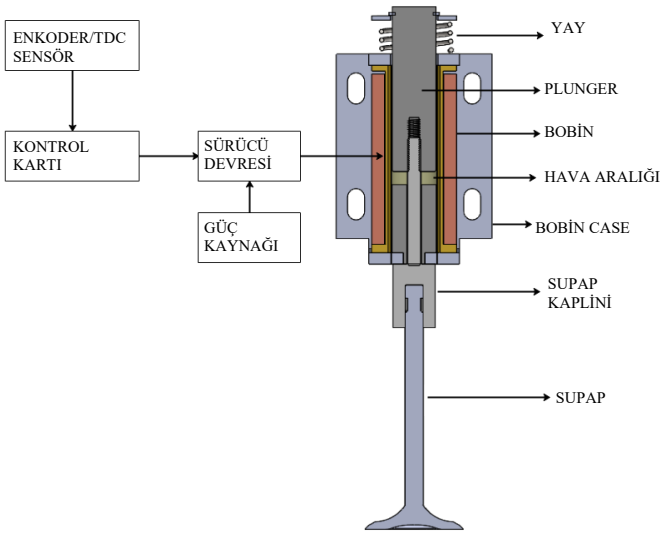
3.2.2. Tasarlanan 1.Tip ESM (Model 1)

Bu çalışmada yay geri dönüşlü elektromekanik supap mekanizması tasarlanmıştır. Bu sistemde selenoid aktüatör, dış kılıf, yay, yay segmanı, plunger, sargı, bobin, pul ve supap kaplininden oluşmaktadır. Sargılara DC gerilim uygulandığında oluşan elektromanyetik kuvvet hareketli parçayı çekmekte gerilim kesildiğinde ise yay kuvveti sayesinde plunger başlangıç konumuna dönmektedir. Bu sayede emme supaplarının açılıp kapanması sağlanmaktadır. Tablo 3.3'de tasarlanan sisteme ve uyartım devresine ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.3. 1.Tip ESM Teknik Özellikleri

1.Tip ESM Özellikleri	**Değer**
Hareketli Kütle (kg)	0.149
Maksimum Stroke (mm)	6.95
Boyut (W*L*H) (mm)	38*42*64
DC Besleme Gerilim (V)	24
Bobin Direnci (Ω)	3.2
Bobin Çapı (mm)	0.5
Sarım sayısı	650
Hareketli Eleman Çapı (mm)	16

Sistemin kesit görünüşü ve kontrol şeması Şekil 3.12'de verilmiştir. Tasarlanan elektromanyetik supap mekanizmasında nüvenin hareket edebileceği mesafe 7 mm ve nüvenin yarıçapı 16 mm'dir.

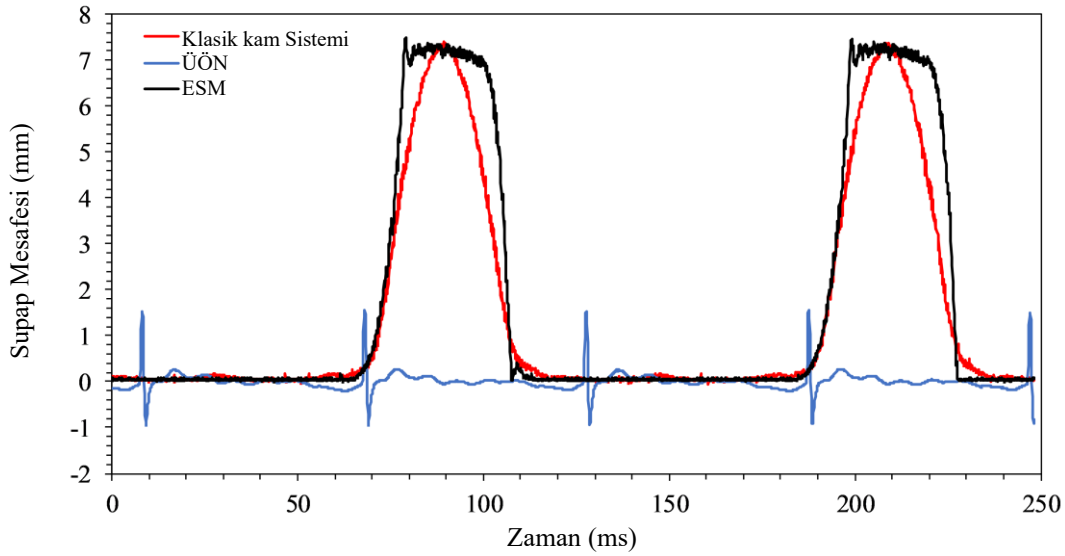


Şekil 3.12. 1.Tip ESM ve Kontrol Şeması

ESM, yay kuvveti ve silindir içi basıncını yenecek şekilde ve supap kapağına en uygun boyutlarda tasarlanmıştır. Ancak bu tasarım yüksek motor devirlerinde gerekli açılma hızını sağlayamadığı için diğer tasarımlara geçilmiştir.

Şekil 3.13'de, 800 dev/dk motor devrinde birinci tip Elektromekanik Supap Mekanizması (ESM) ile klasik kam tahrikli sistemin valf kaldırma profilleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular, düşük motor devirlerinde (özellikle 800 dev/dk) 1.Tip ESM'nin hem valf açıklık profili hem de silindire alınan hava kütlesi açısından klasik sisteme kıyasla belirgin avantajlar sağladığını ortaya koymuştur.

Ancak sistemin dinamik ve manyetik yapısına bağlı olarak, çalışmasını sadece 800–1600 dev/dk aralığında kararlı biçimde sürdürülebilmesi, bu konfigürasyonun geniş devir aralığında çalışan motorlar için uygun olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, sistemin dinamik kararlılığı ve çalışma aralığı göz önünde bulundurularak 1.Tip ESM tercih edilmemiştir.



Şekil 3.13. 800 dev/dk 'da 1. Tip ESM ve Klasik Sistem Valf Profili Karşılaştırılması

3.2.3. Tasarlanan 2. Tip ESM (Model 2)

Tasarlanan 2. Tip elektromekanik supap (ESM) sisteminde, konik piston tipinde bir bobin tasarımı tercih edilmiştir. Bu tasarımda, özellikle çekme yüzeyinin konik formda şekillendirilmesiyle, manyetik alanın etkili olduğu alan genişletilmeye çalışılmış ve böylece elektromanyetik çekme kuvvetinin artırılması hedeflenmiştir. Konik geometrinin

tercih edilmesindeki temel amaç, manyetik akının daha dar bir alanda yoğunlaşarak hareketli parçaya uygulanan kuvveti artırmasıdır. Bu yapı sayesinde hem çekme kuvvetinin büyüklüğü iyileştirilmiş hem de daha hızlı bir supap hareketi sağlanması amaçlanmıştır. Tasarım, klasik düz yüzeyli bobin yapılarına göre daha yüksek manyetik alan gradyanı oluşturarak, sistemin dinamik tepkisini geliştirmeyi hedeflemektedir. Bobinin boyutları Tablo 3.4'te verilmiştir. Söz konusu model, üç boyutlu (3D) elektromanyetik analiz yazılımı olan *Flux* programı kullanılarak detaylı biçimde analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen 3D simülasyonlar sayesinde, sistemin manyetik alan dağılımı, akı yoğunluğu, elektromanyetik çekme kuvveti ve kaçak akı kayıpları gibi kritik parametreler incelenmiştir.

Elde edilen analiz sonuçları, modelin elektromanyetik performansını değerlendirmek amacıyla kullanılmış ve bu sonuçlar Tablo 3.5'de sunulmuştur. 3D analizlerin avantajı, iki boyutlu (2D) modellere kıyasla daha gerçekçi sonuçlar üretmesi ve özellikle karmaşık geometrilerde manyetik akının yönlenişi ile yerel yoğunlaşmaların daha doğru şekilde gözlemlenmesine olanak tanımasıdır. Tasarlanan 2. Tip ESM Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

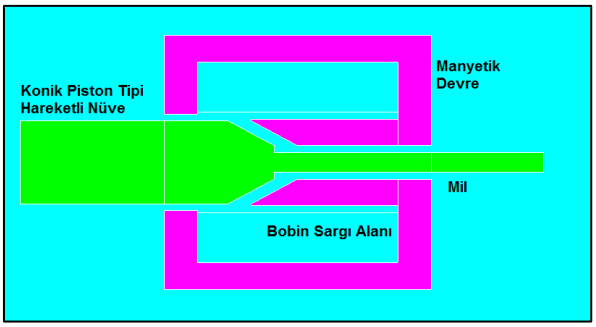
Tablo 3.4. Model 2 Bobin özellikleri

Bobin Çapı	38 mm
Bobin Boyu	40 mm
Mil Çapı	4 mm
Piston Çapı	16 mm
Hava Aralığı	0.2 mm

Tablo 3.5. 3D Flux Analiz Sonuçları

Ni	Turn	Akım	Kuvvet	Endüktans	Tek Tel Kesit Alanı	Tek Tel Çapı	DC Kesit	Direnç Uzunluğu	Direnç	Gerilim	Zaman sabiti (L/R)	Oturma Zamanı
[Amper Sarım]		[A]	[N]	[mH]	[mm^2]	[mm]		[m]	[Ohm]	[V]	[τ]	[5τ]
750	750	1	6	292	0,12	0,1528	0,9673	51,81	50,115	50,11	0,005826504	0,011653
750	250	3	6	32,44	0,36	0,4585	0,1075	17,27	1,856	5,56	0,017473506	0,034947
750	150	5	6	25,87	0,6	0,7643	0,0389	10,36	0,403	2,01	0,064081681	0,128163
750	75	10	6	2,92	1,2	1,5286	0,0096	5,18	0,05	0,5	0,058265043	0,11653
750	50	15	6	1,29	1,8	2,2929	0,0043	3,45	0,015	0,22	0,08609498	0,17219
750	37,5	20	6	0,73	2,4	3,0573	0,0024	2,59	0,006	0,12	0,116542134	0,233084

Tablodaki verilere göre tasarlanan ESM'nin zaman sabiti değeri sistemin gerekliliklerini tam olarak karşılayamadığı için diğer tasarımlara geçilmiştir.



Şekil 3.14. 2. Tip ESM

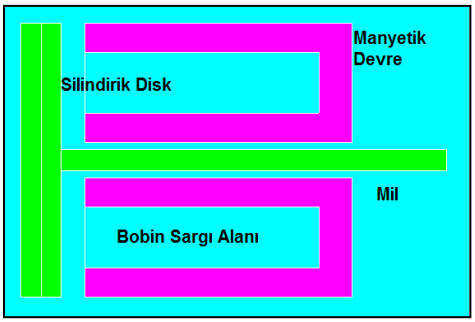
3.2.4. Tasarlanan 3. Tip ESM (Model 3A)

Bu tasarımda (Model 3A), elektromekanik supap (ESM) sistemi için düz yüzeye sahip disk tipi bir mıknatıs devresi tercih edilmiştir. Ayrıca, supap hareketini desteklemek amacıyla hem açma hem de kapama devrelerine yay elemanları entegre edilmiştir. Hareketli eleman (mil ve disk) bu sistemde, yayların depoladığı potansiyel enerji ile elektromanyetik kuvvetin etkisi altında hareket etmektedir.

Bu tip ESM yapısında, kontrol kartı üzerinden iletilen PWM (Pulse Width Modulation) sinyalleri aracılığıyla MOSFET sürücü devrelerinden biri iletime geçirilirken, diğeri kesime alınmakta; bu sayede bobinlerden akım geçişi sağlanmakta ve supapların açılıp kapanması kontrol edilmektedir. Hareketli eleman, başlangıç hareketini büyük ölçüde yay kuvvetiyle gerçekleştirirken, elektromanyetik kuvvet; hareketin sürekliliğini sağlamak ve supabın açık veya kapalı konumda sabitlenmesini desteklemek amacıyla kullanılmaktadır. Her iki bobine de akım uygulanmadığı durumda, disk yay kuvveti yardımıyla denge konumuna geri dönmekte ve bu durumda supaplar yarı açık pozisyonda kalmaktadır. Bu, sistemin pasif durumda dengeye gelmesini sağlayan önemli bir tasarım özelliğidir. Bu modele ait manyetik devre boyutları Tablo 3.7'da verilmiştir. Ayrıca, tasarım Flux yazılımı aracılığıyla analiz edilmiş ve elde edilen simülasyon sonuçları da Tablo 3.7'de Şekil 3.15'de ise Model 3A'nin genel görünüm şeması gösterilmektedir.

Tablo 3.6. Model 3A Bobin özellikleri

Bobin Çapı	38 mm
Bobin Boyu	40 mm
Mil Çapı	4 mm
Disk Çapı	38 mm
Hava Aralığı	0.2 mm



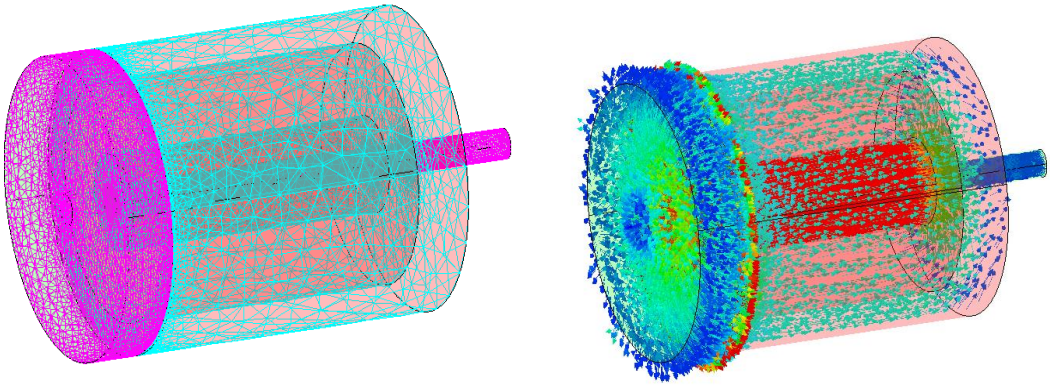
Şekil 3.15. Model 3A

Tablo 3.7. Model 3A Flux Analiz Sonuçları

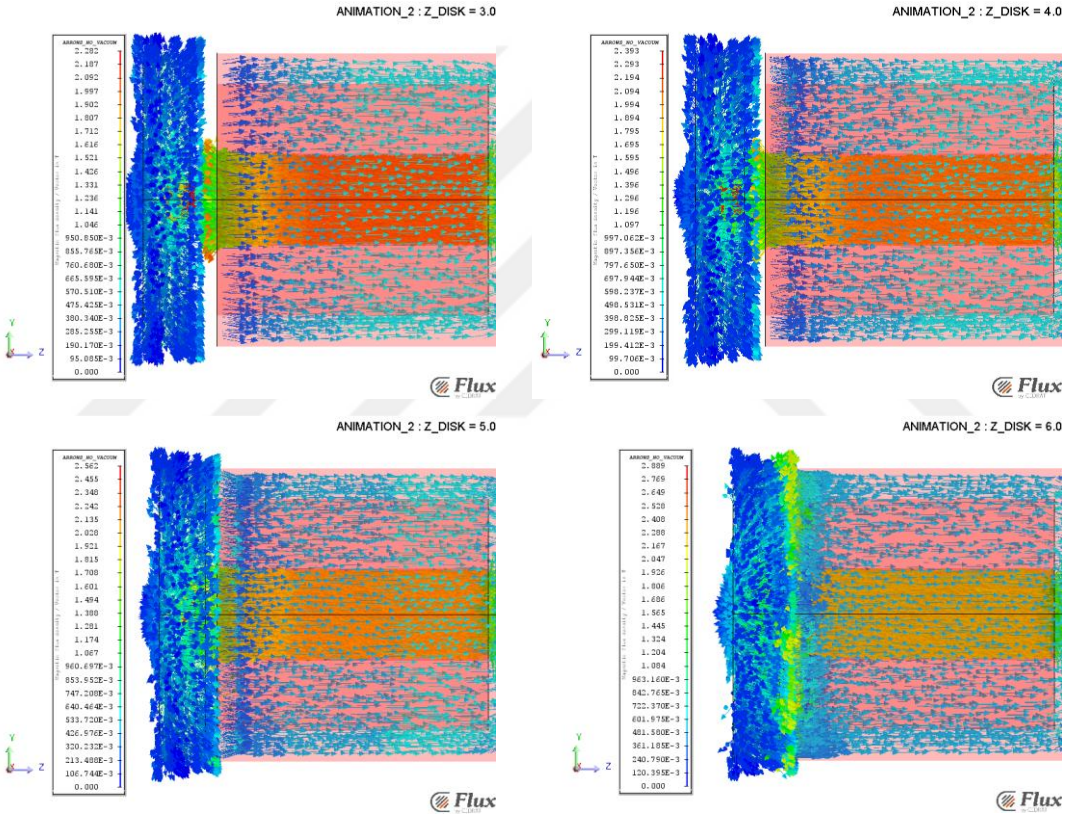
Ni	Turn	Akım	Kuvvet	Endüktans	Tek Tel Kesit Alanı	Tek Tel Çapı	DC Kesit	Direnç Uzunluğu	Direnç	Gerilim	Zaman Sabiti [L/R]	Oturma Zamanı
[Amper sarım]		[A]	[N]	[mH]	[mm^2]	[mm]		[m]	[Ohm]	[V]	[τ]	[5τ]
610	1220	0,5	6	577,29	0,097	0,124	1,393	84,27	117,398	58,69	0,004917	0,009835
610	813	0,75	6	256,57	0,146	0,186	0,671	56,18	37,7	28,27	0,006806	0,013611
610	610	1	6	144,32	0,195	0,248	0,348	42,13	14,672	14,67	0,009836	0,019672
610	407	1,5	6	63,94	0,292	0,372	0,154	28,09	4,348	6,52	0,014703	0,029406
610	305	2	6	36,08	0,39	0,497	0,087	21,06	1,833	3,66	0,019683	0,039366
610	203	3	6	16,03	0,585	0,745	0,038	14,04	0,547	1,64	0,029292	0,058585
610	**153**	**4**	**6**	**9,02**	**0,78**	**0,994**	**0,021**	**10,53**	**0,229**	**0,91**	**0,039348**	**0,078697**
610	122	5	6	5,77	0,975	1,242	0,014	8,42	0,117	0,58	0,049149	0,098298
610	61	10	6	1,44	1,95	2,485	0,0034	4,21	0,014	0,14	0,098198	0,196395
610	40,7	15	6	0,64	2,926	3,727	0,0015	2,8	0,004	0,06	0,145944	0,291888
610	30,5	20	6	0,36	3,901	4,97	0,0008	2,1	0,001	0,036	0,196395	0,392791

Şekil 3.16'te, manyetik devrenin mesh (ağ) yapısı ile diske etki eden manyetik kuvvet çizgileri görsel olarak sunulmuştur. İlgili analizler, şekilde gösterilen mesh yapısı temel alınarak gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlarda manyetik devre içerisindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı da aynı şekilde gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, manyetik akı yoğunluğunun özellikle sistemin iç çekirdeği ile disk ve oturma yüzeyi arasında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde yoğunlaşan manyetik akı, elektromanyetik kuvvetin etkinliğini artırmakta ve aktüatörün verimli çalışabilmesi açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Akı yoğunluğunun yeterli seviyede olması, supap mekanizmasının istenilen hız ve hassasiyetle çalışmasını sağlamakta, böylece sistemin genel performansına doğrudan katkı sunmaktadır.

Özellikle supabın hızlı açılıp kapanması gereken yüksek devir koşullarında, elektromanyetik kuvvetin büyüklüğü ve sürekliliği, motorun hem verimliliği hem de kararlılığı açısından belirleyici olmaktadır.



Şekil 3.16. Model 3A Manyetik Devre Mesh Yapısı ve Kuvvet Çizgileri



Şekil 3.17. Farklı Hava Aralıklarında Diske Etki Eden Manyetik Kuvvet Çizgileri

Bununla birlikte, yapılan incelemelerde disk elemanının yanal yüzeylerinde belirli düzeyde kaçak akı kayıplarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu kaçak akılar, manyetik alan çizgilerinin istenilen akı yolunu takip etmek yerine yan yüzeylere doğru dağılmasına neden olmaktadır. Böyle bir durumda, elektromanyetik kuvvetin etkili olduğu alan daralmakta ve üretilen çekme kuvvetinde verim kayıpları ortaya çıkmaktadır. Bu durumun özellikle düşük hava aralıklarında kritik hale geldiği görülmüştür. Normal

şartlarda, hava aralığının küçülmesiyle elektromanyetik kuvvetin maksimum seviyelere ulaşması beklenirken, kaçak akı kayıpları nedeniyle bu potansiyel tam anlamıyla değerlendirilememektedir. Sonuç olarak, sistemin maksimum kuvvet üretme kapasitesi sınırlanmakta, bu da hem enerji verimliliğini düşürmekte hem de supap hareketlerinin istenilen hız ve kararlılıkta gerçekleşmesini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, elektromekanik supap sistemlerinde kaçak akıların minimize edilmesi, tasarım optimizasyonu ve malzeme seçimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, disk geometrisinin iyileştirilmesi, manyetik devrelerin daha etkin şekilde yönlendirilmesi veya yüksek manyetik geçirgenlik katsayısına sahip malzemelerin tercih edilmesi gibi yöntemler, sistemin performansını artırmaya yönelik kritik tasarım stratejileri olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 3.17' de hareketli diske etki eden kuvvet çizgileri gösterilmiştir. Elektromekanik supap (ESM) mekanizmasının tasarımını etkileyen önemli parametrelerden biri, sistemin endüktans değeri ve buna bağlı olarak belirlenen zaman sabitidir. Endüktans, bobinlerin enerji depolama ve boşaltma davranışlarını doğrudan etkileyen bir büyüklük olup, dolayısıyla ESM'nin dinamik performansını ve çalışma aralığını belirleyen temel unsurlardan biridir.

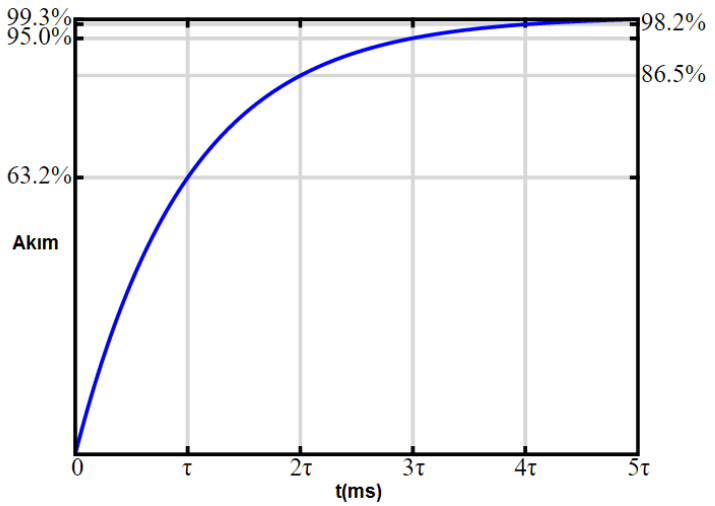
Bobin endüktansı, içinden geçen akımın ani değişimini sınırlayıcı bir etki yaratır. Bu nedenle, bobin üzerinden geçen akım değerleri ani sıçramalar göstermeyip, zamana bağlı olarak yavaş bir şekilde değişir. Direnç-indüktans (R/L) devrelerinde bu davranış, sistemin zaman sabiti (τ) kavramı ile tanımlanır. Zaman sabiti, bobinde depolanan enerjinin yaklaşık %63'lük kısmının transferi için geçen süreyi ifade eder ve τ olarak tanımlanır. Bir R/L devresinde akımın maksimum değerine ulaşması için yaklaşık 5τ sürelik bir zaman geçmesi gerekmektedir. Benzer şekilde, bobin içindeki akımın sıfırlanarak tamamen boşalması için de yine yaklaşık 5τ kadar bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, ESM sisteminin yüksek motor devirlerinde hızlı ve kararlı çalışabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Yüksek devir koşullarında elektromanyetik kuvvetlerin zamanında ve yeterli büyüklükte oluşturulabilmesi için sistemin endüktans değerinin optimum seviyede tasarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde, bobinlerin dolum ve boşalım sürelerindeki gecikmeler, supap kontrol performansını olumsuz yönde

etkileyebilir. Sistemin zaman sabiti değeri, bobin direnci (R) ve endüktansına (L) bağlıdır. Bu durumda zaman sabiti $\boldsymbol{\tau}$ Denklem (3.17)'de gösterilmiştir.

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{3.17}$$

Bu ilişki, sistemin zamana bağlı davranışlarını açıklamak üzere ifade edilmektedir. Şekil 3.18'te, bir bobin üzerinden geçen akımın zamana bağlı değişimini gösteren grafik sunulmuştur. Bu grafik ve önceki açıklamalar doğrultusunda değerlendirildiğinde, elektromekanik supap (ESM) sisteminin yüksek devirlerde etkin bir şekilde çalışabilmesi için en kritik parametrelerden biri, sistemin zaman sabiti (τ) değerinin düşük olmasıdır.

Zaman sabitinin küçük olması, bobinin endüktans değerinin düşük, direnç değerinin ise yüksek olmasına bağlıdır. Ancak, Tablo 3.7incelendiğinde, zaman sabitinin en düşük olduğu tasarım 1. seçenek olarak görülmektedir. Bununla birlikte, bu seçenekte yer alan yüksek direnç değeri, sistem gerilimini artıracağından dolayı uygun bir çözüm olarak değerlendirilememiştir. Bu nedenle, Tablo 3.7 üzerinden yapılan karşılaştırmalar sonucunda, ESM tasarımı için optimum endüktans değerine sahip seçenek belirlenmiş ve yüksek devirli çalışma koşullarına uygun bir yapı hedeflenmiştir. Yapılan 2D ve 3D simülasyon analizleri sonucunda, 305 sarım sayısına sahip, 0,5 mm çapında tel kullanılarak yapılan tasarımın optimum performans koşullarını sağladığı tespit edilmiştir. Bu tasarıma ait analiz sonuçlarına dayanılarak, ilgili ESM prototipi fiziksel olarak üretilmiştir.

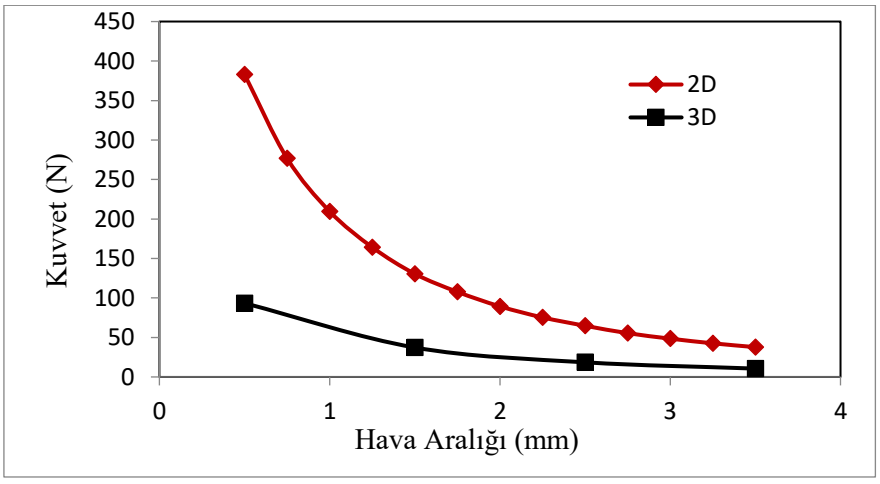


Şekil 3.18. Bir bobinin akım-zaman grafiği

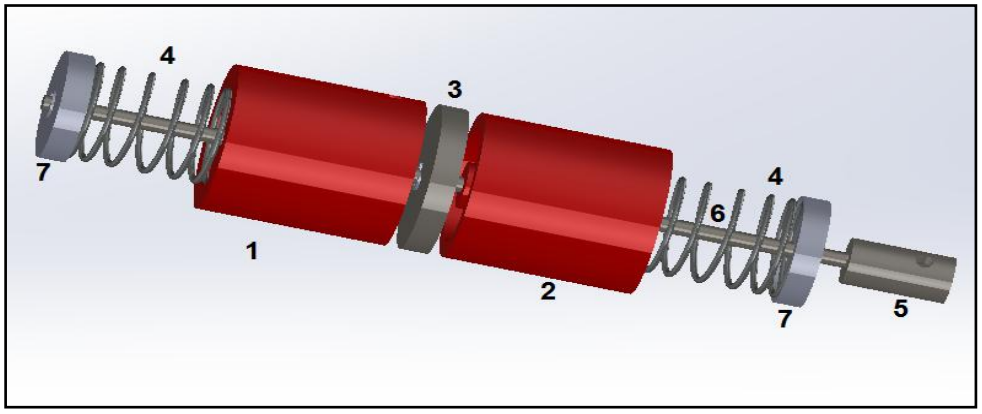
Tasarlanan modelin dinamik analizinde, sistemin toplam endüktans değeri 7,95 mH olarak hesaplanmıştır. En uygun endüktans değerine sahip bobin kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucunda kuvvet-hava aralığı ilişkisi Şekil 3.19'da sunulmuştur. Bu analiz kapsamında, iki boyutlu (2D) teorik hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve buna bağlı olarak kuvvet-hava aralığı eğrisi elde edilmiştir. Ancak, üç boyutlu (3D) analizlerde kaçak akı etkileri de dikkate alındığından, gerçeğe daha yakın sonuçlara ulaşılmış ve sistemin tasarım parametreleri buna göre yeniden değerlendirilmiştir.

Teorik (2D) analiz sonuçlarına göre, disk mesafesi 3,5 mm olduğunda elde edilen maksimum elektromanyetik kuvvet değeri 37 N olarak bulunmuştur. Ancak 3D analizde kaçak akı kayıplarının hesaba katılmasıyla bu kuvvet 10,57 N seviyesine kadar düşmektedir. Benzer şekilde, hava aralığı 0,5 mm olduğunda, teorik hesaplamalar 383 N'luk bir kuvvet değeri öngörürken, 3D analizde bu değer 93 N olarak elde edilmiştir. Bu durum, kaçak akının manyetik devre performansı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Ayrıca, bu modelde kullanılan mil çapının 4 mm olması nedeniyle, ESM'nin çalışma koşullarında meydana gelen yatay kuvvetlerin etkisiyle milde eğilme deformasyonları gözlemlenmiştir. Bu deformasyonlar, sistemdeki mekanik sürtünme kuvvetlerini artırarak hareketli elemanların serbest hareketini kısıtlamış, dolayısıyla sistemde mekanik sıkışmalara neden olmuştur. Bu problemi gidermek amacıyla, mil çapı 6 mm'ye yükseltilmiş ve böylece sistemin yapısal dayanımı artırılmıştır. Tasarlanan modelin 3D modeli ise Şekil 3.20'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Model 3A Hava Aralığı-Kuvvet grafiği



Şekil 3.20. Model 3A CAD görüntüsü (1.Kapatma Bobini, 2.Açma Bobini, 3.Hareketli Disk, 4.Yay, 5.Kaplin, 6.Mil, 7.Yay Kapakları)

3.2.5. Tasarlanan 3.Tip ESM (Model 3B)

Elektromekanik supap (ESM) tasarımında en kritik hususlardan biri, sistemin başlangıç hareketini sağlayacak yeterli büyüklükte elektromanyetik kuvvetin elde edilmesidir. Supap açıklığının 7 mm olması hedeflendiğinde, elektromanyetik kuvvetin özellikle 3,5 mm strok pozisyonunda, sistemde karşılaşılan gaz basıncı ve yay kuvveti gibi dirençleri yenebilecek düzeyde olması gerekmektedir. Bu gereksinimi karşılayabilmek amacıyla disk geometrisi üzerinde yapısal değişikliklere gidilmiştir ve böylece 3,5 mm strokta daha yüksek elektromanyetik çekme kuvveti üretilmesi sağlanmıştır.

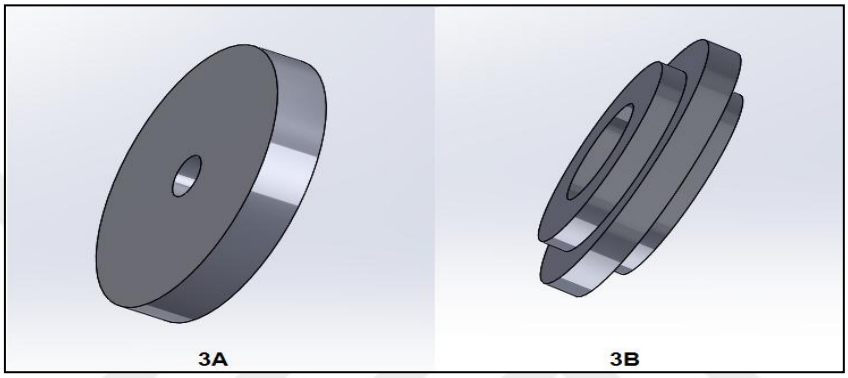
Bu doğrultuda geliştirilen yeni modelde, 3A modeline kıyasla hareketli eleman tasarımında yapısal bir revizyona gidilmiştir**.** Yapılan değişiklikler, sistemin elektromanyetik performansını ve dinamik tepkisini iyileştirmeyi amaçlamakta olup, özellikle supap hareketini gerçekleştiren parçaların geometrisi ve kütlesi üzerinde odaklanılmıştır.

Yenilenen tasarım sayesinde, elektromanyetik kuvvetin aktarımı daha verimli hale getirilmiş ve hareketli parçanın sistem içerisindeki tepkime süresi optimize edilmiştir. Bu iyileştirme, yüksek devirlerde kararlılık ve hızlı yanıt alınabilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

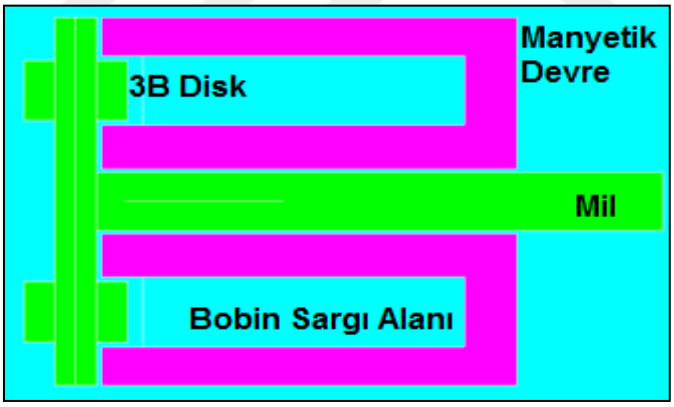
3A modelinde düz yüzeye sahip silindirik bir disk yapısı kullanılırken, 3B modelinde ise omuzlu (faturalı) silindirik bir disk geometrisine geçilmiştir. Bu yapısal değişiklik

sayesinde, 3,5 mm strok mesafesinde kaçak akı kayıpları azaltılmış ve net çekme kuvveti artırılmıştır. Böylece, sistemin daha kararlı ve verimli çalışması mümkün hale gelmiştir.

Disk tasarımlarına ilişkin görsel karşılaştırma Şekil 3.21'de sunulmuştur. Ayrıca, 3B modeli üzerinde Flux simülasyon yazılımı kullanılarak iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiş, elde edilen bulgular aşağıdaki bölümlerde detaylı biçimde açıklanmıştır. Şekil 3.22'de ise Model 3B'nin genel görünümü verilmiştir.



Şekil 3.21. Model 3A ve 3B Disk Tasarımları

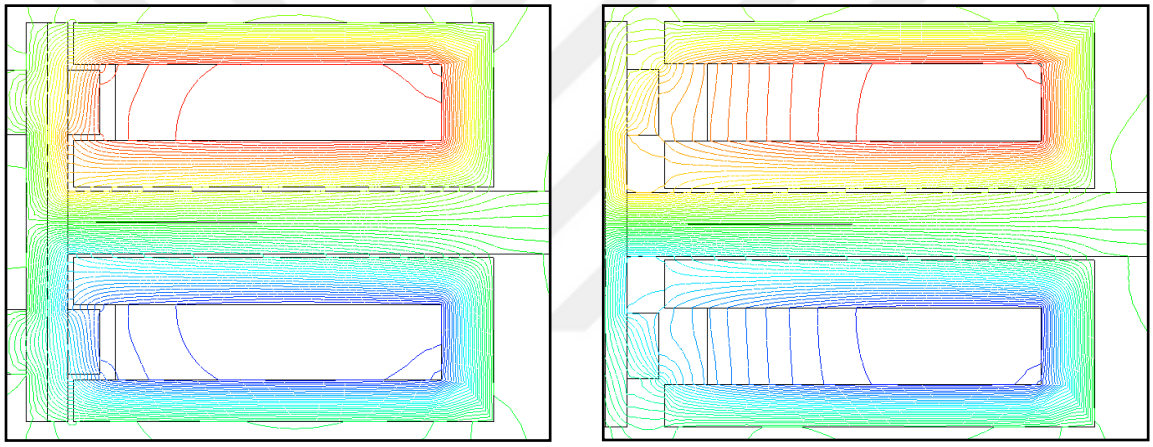


Şekil 3.22. Model 3B

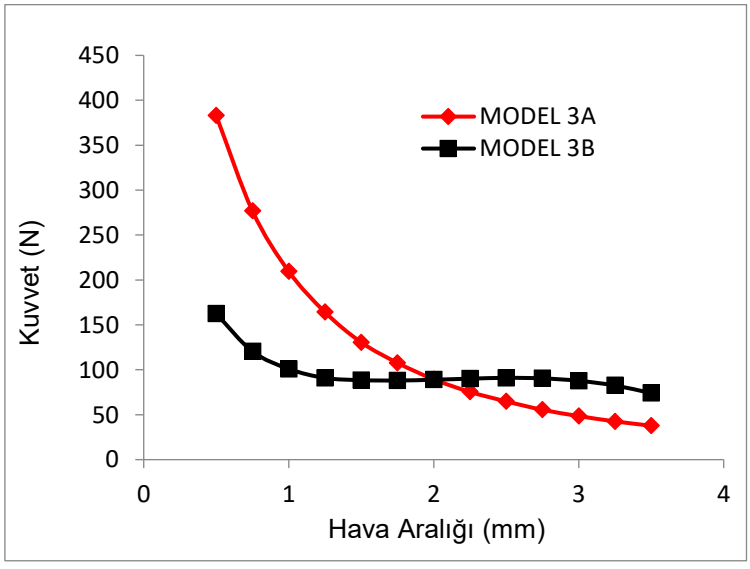
Şekil 3.23'de, 0,5 mm ve 3,5 mm hava aralığında diske etki eden elektromanyetik kuvvet çizgileri gösterilmiştir. İlgili şekildeki manyetik akı yoğunluğu dağılımından da anlaşılacağı üzere, 3,5 mm hava aralığında diske etki eden çekme kuvveti artırılmıştır. Ancak hava aralığı azaldıkça, manyetik alan çizgilerinin doğrudan disk üzerindeki çıkıntı üzerinden devreyi tamamlaması nedeniyle, bu tasarımda (Model 3B) meydana gelen kuvvet, Model 3A'ya kıyasla daha düşük seviyelerde oluşmuştur.

Şekil 3.24'de, Model 3A ve Model 3B'nin Flux simülasyon yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilen analizleri sonucunda elde edilen kuvvet-hava aralığı (force-air gap) grafiği sunulmuştur. Bu grafikten elde edilen verilere göre, 3,5 mm hava aralığında diske etki eden kuvvet Model 3A'da yaklaşık 37 N iken, Model 3B'de aynı mesafede bu değer 74 N olarak ölçülmüştür. Buna karşın, hava aralığı 2 mm seviyesine düştüğünde, Model 3B'nin ürettiği kuvvet değeri, Model 3A'nın altında kalmıştır.

Ancak elektromekanik supap sistemlerinde kritik kuvvet ihtiyacı, maksimum hava aralığı olan 3,5 mm'de ortaya çıktığından, daha önceki bölümlerde de açıklandığı üzere, bu gerekçeyle Model 3B'nin ESM tasarımı açısından daha uygun bir çözüm sunduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 3.23. 0,5 ve 3,5 mm hava aralığındaki kuvvet çizgileri



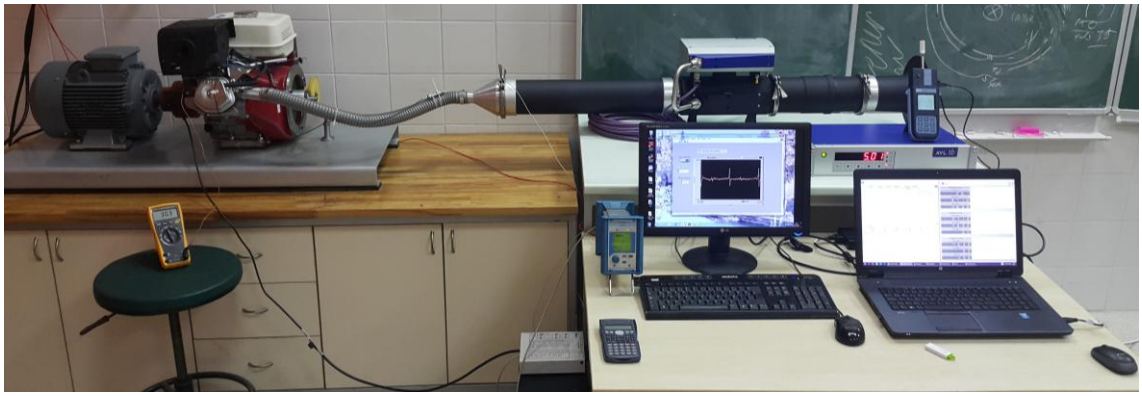
Şekil 3.24. Model 3A ve 3B Hava Aralığı-Kuvvet Grafiği

3.3. Klasik Kam Mekanizması Motor Testleri

Bu çalışmanın bu aşamasında, klasik kam mekanizmasına sahip test motoru kullanılarak 800 ile 3000 devir/dakika arasında, 200 dev/dak aralıklarla deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, her bir motor devrinde emme havası sıcaklığı, egzoz çıkış sıcaklığı, silindir içi basıncı ve silindire alınan hava kütlesi ölçümleri, Şekil 3.25'de gösterilen deney düzeneği üzerinden hassas sensörler aracılığıyla kaydedilmiştir. Ayrıca, deney ortamındaki hava koşullarını doğru şekilde değerlendirebilmek için nem oranı, ortam sıcaklığı ve atmosferik basınç gibi çevresel parametreler de ölçülmüş ve sistematik olarak kaydedilmiştir.

Elektrik motoru, ABB marka motor sürücüsü kontrolünde çalıştırılarak, test motorunun yanma olmaksızın sabit devirlerde mekanik tahriki sağlanmıştır. Böylece motorun yanma olayından bağımsız olarak mekanik hareketi kontrol edilerek, deney koşullarının standardizasyonu temin edilmiştir. Motor istenilen devire ulaştığında, ultrasonik debimetre kullanılarak silindire alınan hava kütlesi ölçülmüş ve veriler detaylı şekilde toplanmıştır.

Ayrıca, her çalışma devri için krank mili üzerine monte edilmiş enkoder ve basınç sensörlerinden elde edilen veriler, DAQ (Data Acquisition) sistemi ile gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Bu sensörler sayesinde krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç değişimleri detaylı biçimde incelenebilmiş ve motorun farklı çalışma noktalarındaki performans karakteristikleri ortaya konmuştur. Elde edilen bu veriler, deneysel analizlerin güvenilirliği ve motor davranışlarının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi için temel oluşturmuştur.



Şekil 3.25. Klasik Sistem Test Düzeneği

3.4. Deneysel Verilerin Elde Edilmesi

Deney düzeninde, klasik ve elektromanyetik emme supap profilleri ile ÜÖN konumu, silindir içi basınç ve kontrol sinyalleri National Instruments marka SCB68 veri toplama modülü kullanılarak elde edilmiştir. Veri toplama süreci, güçlü grafiksel arayüzü ve gerçek zamanlı kontrol yetenekleri ile öne çıkan LabVIEW yazılımı üzerinden yürütülmüştür. Ölçümlerde, her bir kanal için 30 kS/s örnekleme hızı kullanılmıştır. Bu sayede supap hareketleri, silindir içi basınç değişimleri ve kontrol sinyallerine ilişkin veriler yüksek çözünürlükte ve zaman kayması olmaksızın toplanmıştır. Yüksek örnekleme hızı sayesinde hem hızlı geçişlerin yakalanması mümkün olmuş hem de sistem davranışlarının ayrıntılı şekilde analiz edilmesine zemin hazırlanmıştır. Deney ortamında kullanılan veri toplama sisteminin arayüzü Şekil 3.26'da detaylı şekilde sunulmuştur.

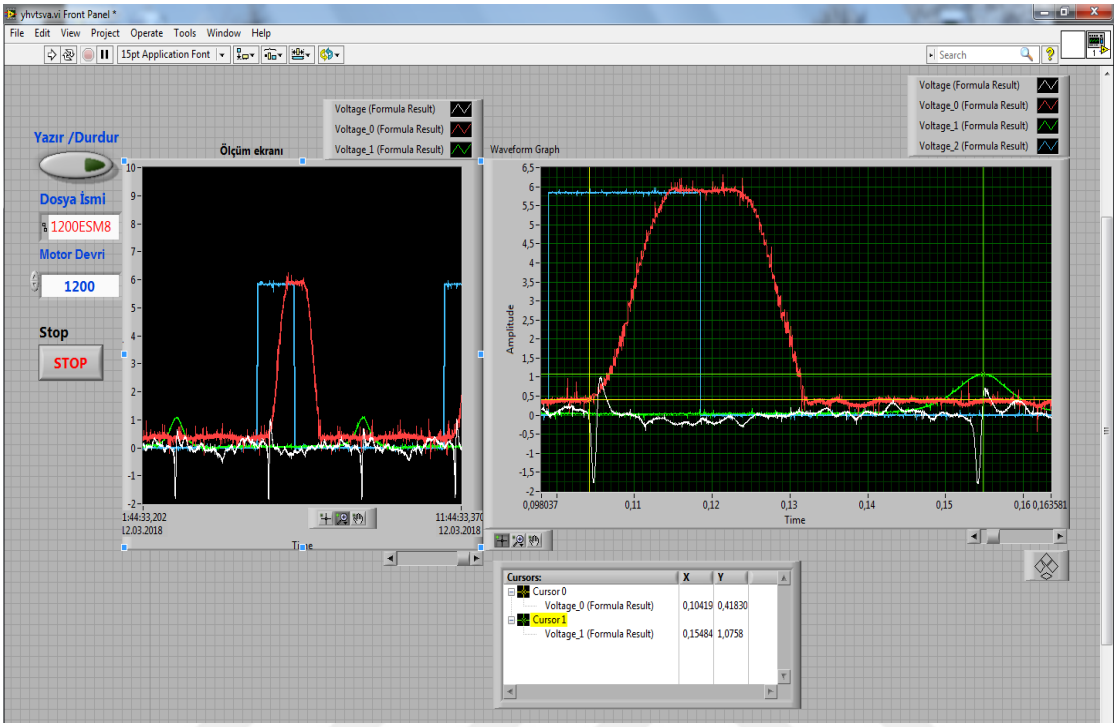
Supap profili ölçümleri, yüksek hassasiyetli RIFTEK 603 model lazer mesafe sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sensör, ±0,5 μm ölçüm doğruluğu ve yüksek örnekleme frekansı sayesinde supap hareketlerinin zamana bağlı konum değişimlerini güvenilir şekilde kaydetmiştir. Ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla sensör, supap eksenine dik olacak şekilde sabitlenmiş ve titreşimlerden etkilenmemesi için rijit bir bağlantı elemanı üzerinde konumlandırılmıştır.

Deney süresince ortam koşullarının etkilerini göz ardı etmemek için, hava sıcaklığı, bağıl nem ve atmosfer basıncı değerleri Delta Ohm HD21AB17 çevresel veri kaydedici cihazı ile ölçülmüştür. Bu cihaz, ±0,1 °C sıcaklık, ±0,1 %RH nem ve ±1 hPa basınç hassasiyetine sahiptir. Ortam verileri, supap profili ölçümleri ile senkronize edilerek kaydedilmiştir.

Deneylerde krank mili hareketinin referans noktası olarak ÜÖN konumunun doğru şekilde belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, krank mili üzerine yerleştirilen yüksek hassasiyetli bir enkoder ve ÜÖN sensörü kullanılmıştır. Enkoder, krank mili dönüşünü açısal olarak izleyerek her bir motor çevriminde pistonun KA konumunu belirlemektedir.

Elde edilen veriler, veri toplama sistemi aracılığıyla bilgisayara aktarılmış, ham veriler üzerinde öncelikle gürültü azaltma ve filtreleme işlemleri uygulanmıştır. Daha sonra,

deneysel sonuçların güvenilirliğini artırmak için ölçümler üç tekrar halinde gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler analizlere esas alınmıştır.



Şekil 3.26. Data Toplama Programı Arayüzü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

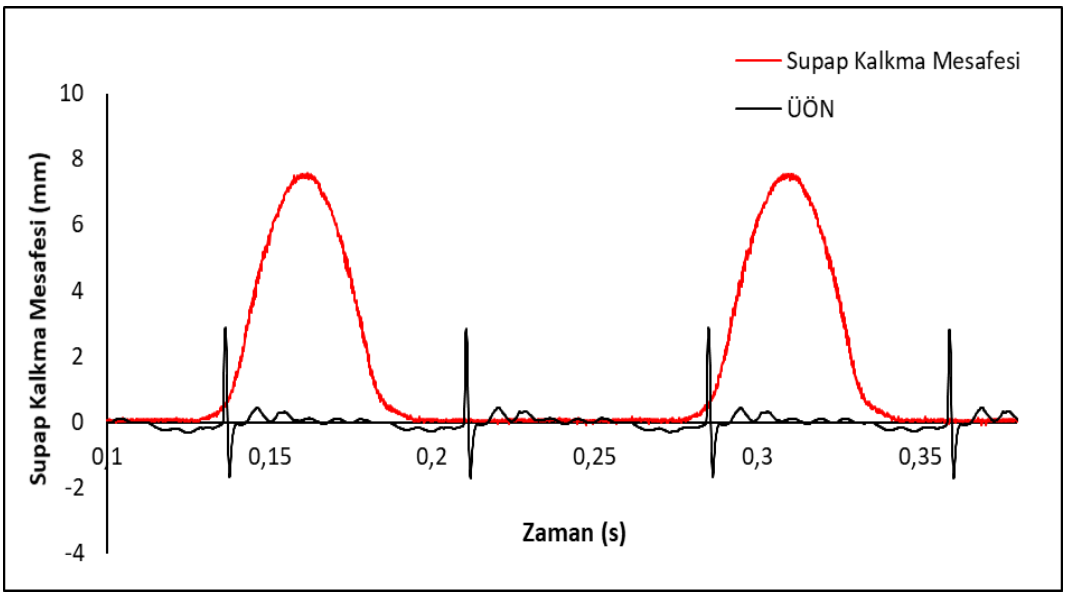
Bu tez çalışmasının amacı, içten yanmalı buji ateşlemeli tek silindirli bir motorda elektromekanik supap mekanizması kullanımın motor volümetrik verimi ve silindir için basıncına etkilerinin incelenmesidir. Bu çalışmanın sonuçları iki bölümde sunulacak ve tartışılacaktır;

- Klasik supap mekanizması ile yapılan motor testleri
- ESM ile yapılan motor testleri

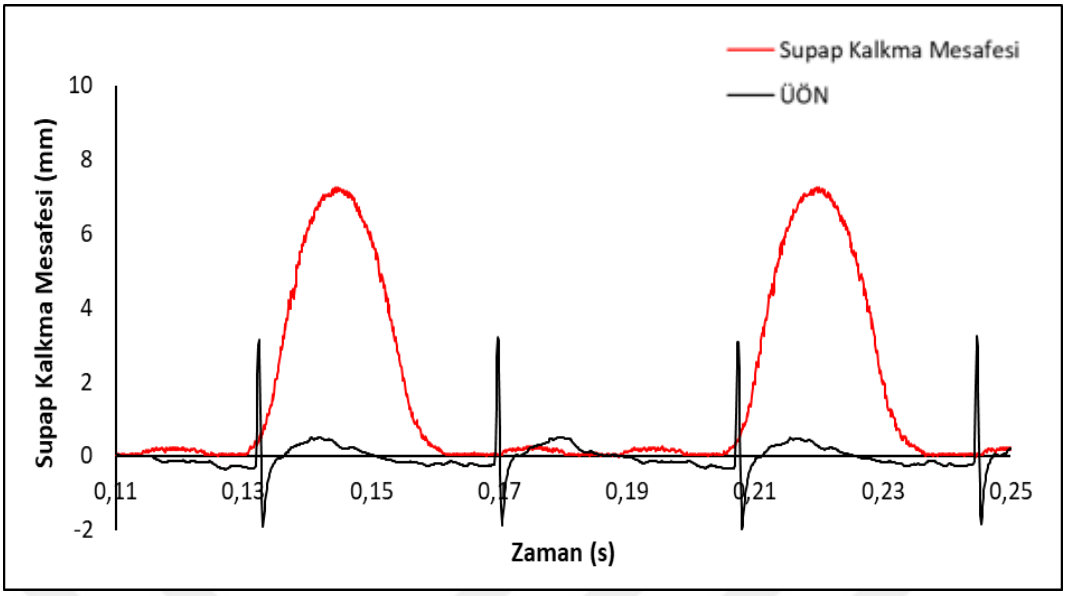
4.1. Klasik Sistem Deney Sonuçları

Klasik supap mekanizmasına sahip sistem üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, farklı motor devirlerinde silindir içi basınç, emme supabı hareket profili, emme ve egzoz havası sıcaklıkları ile silindire alınan hava miktarı ve çevresel hava koşullarına ilişkin veriler sistematik olarak elde edilmiştir.

Klasik tip supap mekanizmasına ait 800 ve 1600 dev/dk motor devirlerinde elde edilen emme supabı hareket profili ile ÜÖN sinyallerinin zamana bağlı değişimi, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de detaylı biçimde sunulmaktadır. Bu grafiksel veriler, supap zamanlaması ile krank mili konumu arasındaki ilişkinin karşılaştırmalı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.1. 800 dev/dk'daki klasik emme supabı profili



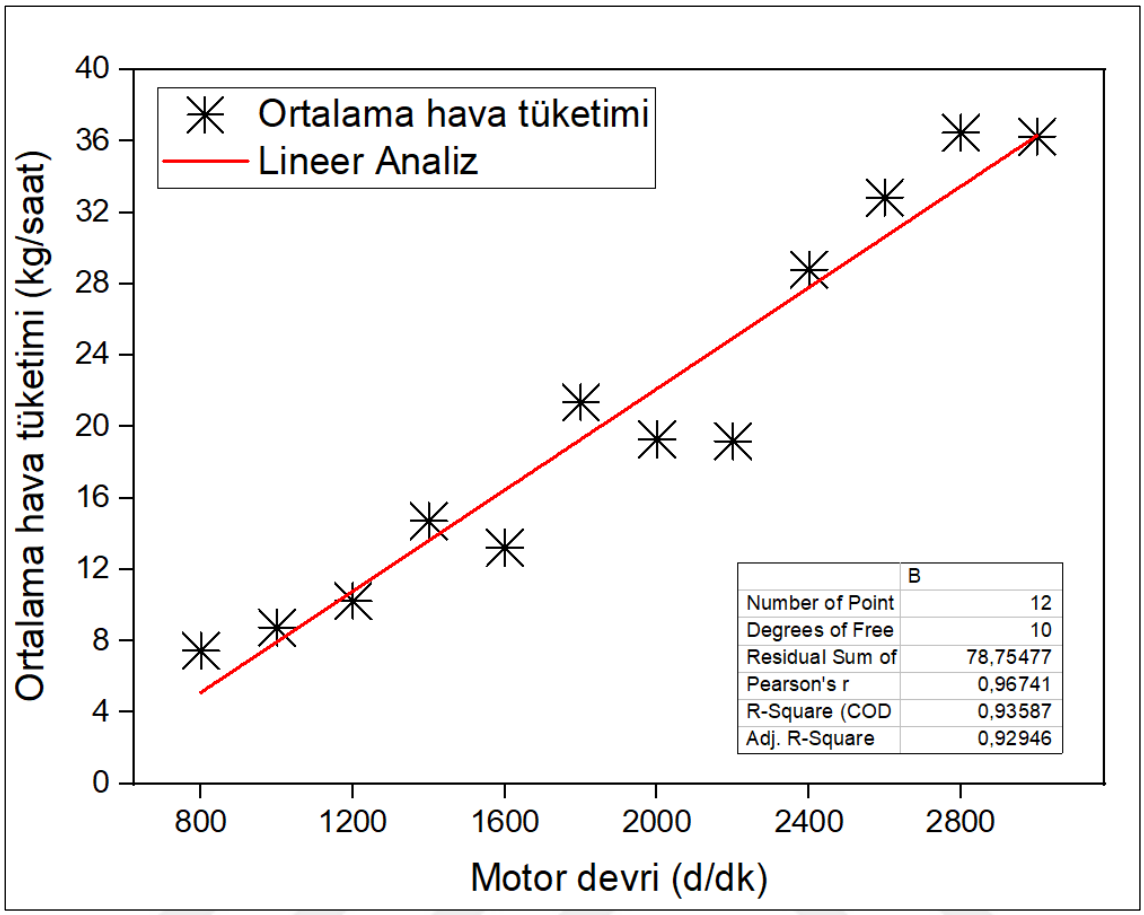
Şekil 4.2. 1600dev/dk'daki klasik emme supabı profili

4.1.1. Ultrasonik Debimetreden Elde Edilen Test Sonuçları

Yapılan motor testleri kapsamında, farklı motor devirlerinde (800-3000 dev/dk) silindire alınan hava miktarı, AVL Flowsonic 100 marka debimetre kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen ortalama hava kütlesi değerleri, Tablo 4.1'de sunulmuştur. Hava debisi ölçümleri, test güvenilirliğini artırmak amacıyla her bir devir noktasında üç kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Bu ölçümler sonucunda elde edilen ortalama değerler, test koşulları altında silindir içerisine alınan hava miktarını temsil etmektedir. Elde edilen bu veriler, volümetrik verim hesaplamalarında temel parametrelerden biri olarak kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 4.3'de motor devrine göre hava tüketim grafiği gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Silindire alınan ortalama hava miktarı

Motor Devri (dev/dk)	Test süresi [sn]	Ortalama Hava Kütlesi [kg/h]
800	180	7.446
1000	180	8.765
1200	180	10.234
1400	180	14.719
1600	180	13.218
1800	180	21.362
2000	180	19.294
2200	180	19.187
2400	180	28.797
2600	180	32.855
2800	180	36.478
3000	180	36.249



Şekil 4.3. Motor Devrine Bağlı Olarak Hava Tüketim Grafiği

4.1.2. Silindir İçi Basınç Ölçümleri

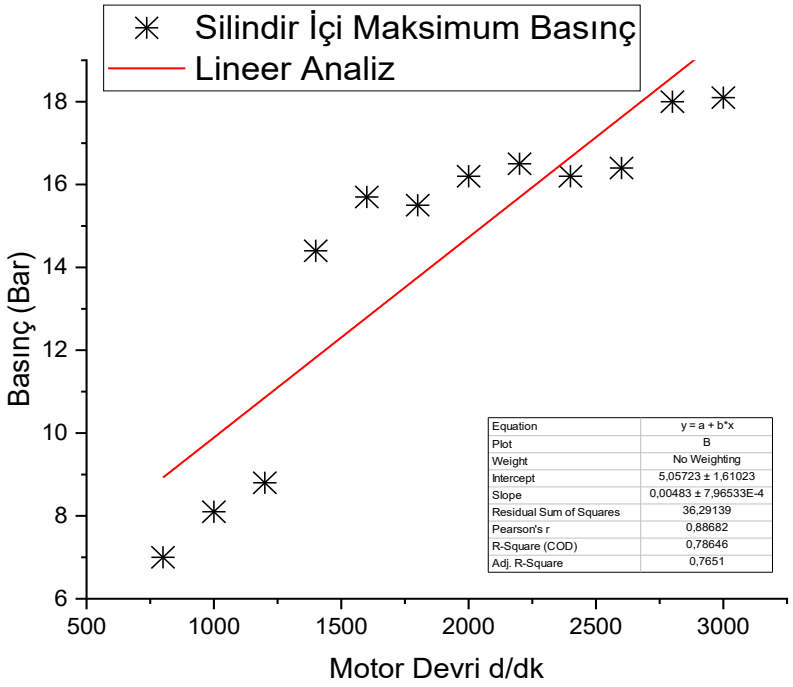
Bu aşamada, silindir içi gaz basıncı verileri krank açısına bağlı olarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlerde, her bir motor çevrimi için silindir içerisindeki basınç değişimleri kayıt altına alınmış ve bu değerler doğrultusunda silindir içi gaz basıncının krank açısına göre değişimi analiz edilmiştir.

Bu analiz, yanma sürecinin karakteristiğini belirlemek ve farklı motor devirlerinde emme, sıkıştırma, yanma ve egzoz fazlarına ait basınç profillerini karşılaştırmak açısından büyük önem taşımaktadır. Elde edilen veriler hem klasik hem de elektromekanik supap sistemlerinin karşılaştırmalı performans değerlendirmelerinde temel referans olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'da sunulmuştur. Silindir gaz basıncı verileri, her bir motor devri için 50 çevrimin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

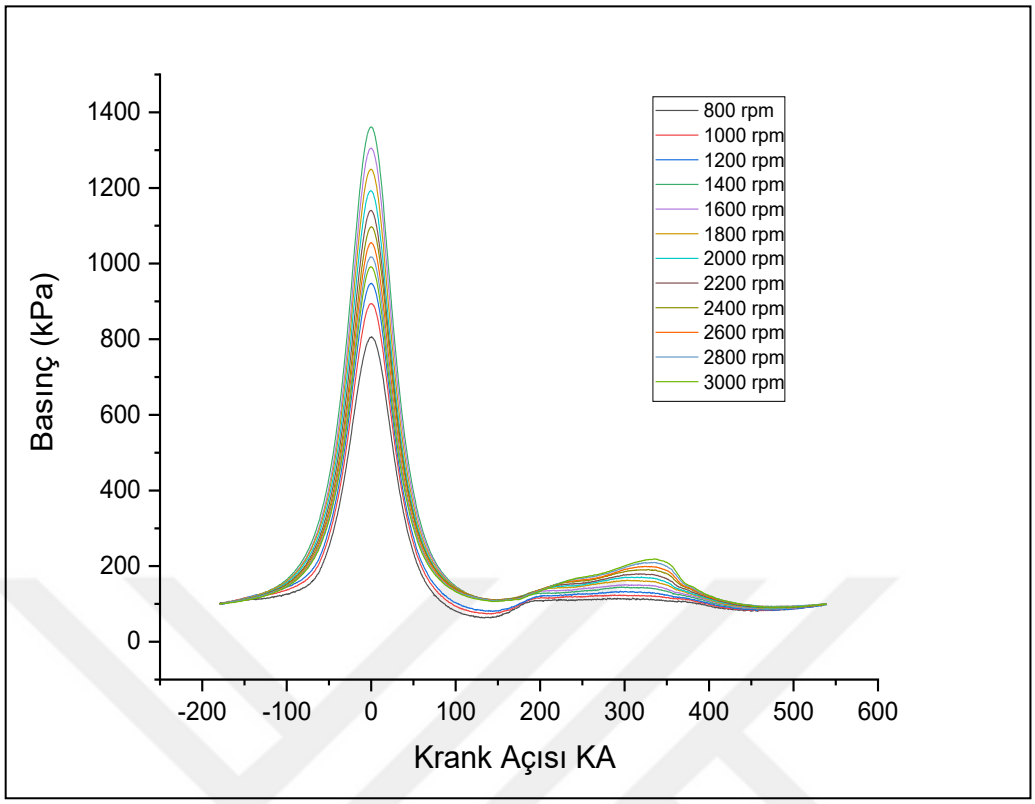
Analizler sonucunda, maksimum silindir gaz basıncının genel olarak motor devrinin artışıyla birlikte yükseldiği gözlemlenmiştir. Özellikle, maksimum basınç değerlerinin 2800 dev/dk ve 3000 dev/dk motor devirlerinde elde edildiği, buna karşın 1600 dev/dk ile 2600 dev/dk aralığında ölçülen maksimum silindir basınçlarının birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

800 dev/dk ile 1200 dev/dk aralığında motor devrinin artmasına paralel olarak silindir gaz basıncında da artış eğilimi gözlenmiştir. Bununla birlikte, 1200 dev/dk'dan 1400 dev/dk'ya geçişte, maksimum silindir gaz basıncında belirgin bir artış yaşandığı saptanmıştır. Bu durumun, test motorunda yer alan kam mekanizmasında bulunan dekompresyon özelliğinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Şekil 4.5'de motor devrinin artışına bağlı olarak krank açısı ekseninde değişen silindir gaz basınçları incelendiğinde, özellikle sıkıştırma ve genişleme süreçlerinde gaz basıncı eğrilerinin daha geniş bir profile sahip olduğu tespit edilmiştir. Her ne kadar sıkıştırma oranı sabit ve kam profilleri değişken değilse de emilen hava miktarındaki artışın bu süreçleri etkileyerek silindir gaz basıncı profilinin motor devriyle birlikte yükselmesine olanak sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.4.Motor devrine göre maksimum silindir basınçları



Şekil 4.5. Krank açısına bağlı olarak silindir basınçları

4.1.3. Emme ve Egzoz Manifoltu Sıcaklıkları

Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında, farklı motor devirlerinde elde edilen emme manifoldu ve egzoz çıkış sıcaklıkları Tablo 4.2'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Test sonuçları incelendiğinde, motor devri arttıkça egzoz gazı sıcaklığının 1400 dev/dk değerine kadar istikrarlı bir şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, artan motor devri ile yanma odasında gerçekleşen enerji dönüşümünün ve egzoz gazı debisinin artmasına bağlanabilir. Ancak 1400 dev/dk'ya ulaşıldığında, silindir içerisindeki gazların boşaltılması sırasında meydana gelen dekompresyon etkisi nedeniyle egzoz çıkış sıcaklığında ani ve belirgin bir düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş, silindir içi basıncın geçici olarak azalması ve egzoz gazlarının genleşme eğilimi göstermesi ile ilişkilendirilebilir.

Söz konusu dekompresyon etkisinin ardından, motor devri daha da yükseldikçe egzoz sıcaklıklarının yeniden artış eğilimine girdiği tespit edilmiştir. Bu ikinci artış eğilimi, artan motor yükü ve daha yoğun yanma olayları ile egzoz sistemine aktarılan enerji miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Böylelikle yüksek devirlerde, egzoz gazı sıcaklığı motorun termal yükünü ve yanma karakteristiğini yansıtan önemli bir parametre olarak dikkat çekmektedir.

Tablo 4.2. Emme manifoldu ve egzoz çıkış sıcaklıkları

Motor Devri (dev/dk)	Emme Manifoldu Sıcaklığı (°C)	Egzoz Sıcaklığı (°C)
800	23,1	39
1000	23,2	40
1200	23,2	41
1400	23,2	30
1600	23,4	32
1800	23,4	36
2000	23,4	39
2200	23,5	43
2400	23,5	50
2600	23,5	51
2800	23,6	53
3000	23,9	60

4.2. Volümetrik verimin hesaplanması

Hava emme manifoltundan geçiş esnasında, yüzeyde oluşan sürtünme etkileri hava akışını sınırlandırmakta ve bu durum emme hattında basınç düşümüne yol açmaktadır. Ayrıca, hava silindir içerisine yöneldiğinde, hava katmanları arasında ortaya çıkan viskoz sürtünme kayıpları da sistem verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Emme hattındaki bu kayıplar, yalnızca hava akışıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda hava filtresi ve emme supaplarının geometrisi gibi yüzeysel özelliklerden de etkilenmektedir. Tüm bu etkenler, emme zamanı boyunca silindir içerisine alınabilen hava miktarında azalmaya neden olmaktadır.

Bu bağlamda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, motorun hava filtresi ve karbüratörü devreden çıkarılmış; debimetre doğrudan emme manifoldu çıkışına bağlanarak motorun gerçek hava tüketimi ölçülmüştür.

Motor performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan temel parametrelerden biri olan volümetrik verim, silindire gerçekte alınan hava miktarının, teorik olarak alınması gereken hava miktarına oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Bu oran, motorun hava dolum etkinliğini ve dolaylı olarak yanma verimliliğini ifade etmektedir.

Volümetrik verim Denklem (4.1)'de verilmiştir (η_v);

$$\eta_v = \frac{2.\dot{m}_a}{\rho_{a,i}.V_d.N} \tag{4.1}$$

Bu denklemde;

$\rho_{a,i}$: Giren havanın yoğunluğu,

$\dot{m}_a$: Giren havanın kütlesel debisi,

Alternatif olarak volümetrik verim Denklem (4.2)'de de belirlenebilir;

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,i}.V_d} \tag{4.2}$$

m_a : Silindir başına giren havanın kütlesi olarak ifade edilir.

Bu kapsamda, volümetrik verimin hesaplanabilmesi için gerekli temel parametrelerden biri olan silindire giren havanın kütlesel debisi testler sırasında belirlenmiştir. Havanın yoğunluğunun doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için test ortamındaki çevresel koşullar dikkate alınmış; ortam sıcaklığı, bağıl nem oranı ve atmosfer basıncı gibi veriler, Delta Ohm marka hava kalitesi ölçüm cihazı kullanılarak kaydedilmiştir. Ayrıca, hesaplamalarda daha yüksek doğruluk sağlamak amacıyla, ortamdaki karbondioksit (CO_2) konsantrasyonlarına ilişkin veriler de dikkate alınmıştır. Bu değerlere ilişkin detaylar, Tablo 4.3'te sunulmaktadır. Ölçülen çevresel parametreler, havanın yoğunluğunu etkileyen başlıca faktörler olduğundan, bu verilerin kullanımı volümetrik verim hesaplamalarının doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

Tablo 4.3. Test Şartlarındaki Ortam Hava Değerleri

Test	CO_2 (ppm)	RH (%)	T_1 (°C)	P_{atm} (hPa)
0	421	32,2	23,5	971
1	420	32,2	23,5	971
2	422	32,4	23,6	971
3	426	32,3	23,6	971
4	432	32,1	23,6	971
5	430	32,1	23,6	971
6	428	32,1	23,6	971
7	425	32,1	23,6	971
8	421	32,1	23,6	971
9	423	32,1	23,6	971
10	425	32,1	23,6	971

Bu verilerden yola çıkılarak ortam şartlarında havanın yoğunluğu 1,139 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda;

$$\eta_v = \frac{2.\dot{m}_a}{\rho_{a,i}.V_d.N} \tag{4.3}$$

Formülünde değerler yerine yazıldığında;

$$\eta_v = \frac{2.7{,}446}{1{,}139.389.10^{-6}.800.60} \tag{4.4}$$

İlgili eşitlik kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, 800 dev/dk motor devrinde volümetrik verim yaklaşık olarak %70 olarak bulunmuştur. Diğer test devirlerinde elde edilen volümetrik verim sonuçları ise Tablo 4.4'te ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda, volümetrik verimin genellikle motor devri ile arttığı gözlemlenmiş, ancak bazı devir aralıklarında motor devri artsa da volümetrik verimde düşüşlerin meydana geldiği belirlenmiştir. Özellikle 1200 dev/dk'dan 1400 dev/dk'ya geçişte volümetrik verimin anlamlı bir artış gösterdiği; 2600 dev/dk ve 2800 dev/dk motor hızlarında ise maksimum seviyelere ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, motor devrinin artışıyla birlikte emme ve egzoz supaplarının açılma ve kapanma zamanlarının değişmesinden kaynaklanmaktadır. Nitekim motor devri yükseldikçe bir yandan silindire daha fazla hava alınmasıyla volümetrik verim artarken, diğer yandan egzoz sisteminde oluşan hidrolik kayıplar da artış göstermekte ve bu durum hem egzoz gazı basıncında hem de egzoz gazı sıcaklığında yükselmeye neden olmaktadır.

Test sonuçları, bazı devir aralıklarında egzoz basıncının artmasının, silindire alınacak taze dolgu havasının girişini kısmen engellediğini ve bu nedenle volümetrik verimin düştüğünü ortaya koymuştur. Bu bağlamda, elektromekanik supap mekanizmasının avantajlarından yararlanılarak, özellikle bu kritik devir geçişlerinde egzoz supabının kapanma zamanlaması geciktirilmekte, böylece süpürme işlemi daha etkin gerçekleştirilmekte ve volümetrik verimin artırılması hedeflenmektedir.

Tablo 4.4. Volümetrik Verim Değerleri

Devir (dev/dk)	**800**	**1000**	**1200**	**1400**	**1600**	**1800**	**2000**	**2200**	**2400**	**2600**	**2800**	**3000**
Volümetrik Verim (%)	70,02	65,94	64,16	79,09	62,15	89,28	72,57	65,61	90,26	95,06	98,01	90,90

4.3. Supap Zamanlaması

Supap zamanlaması, içten yanmalı motorlarda emme ve egzoz supaplarının ne zaman açılıp kapandığını, yani krank mili dönüşü (°KA – Krank Açısı) cinsinden supap zamanlamasını ifade eder. Bu zamanlama, motorun hava-yakıt karışımını alma, yanma sonu emisyonlarının dışarı atılması ve dolayısıyla verimlilik, performans ve emisyon gibi kritik parametrelerini doğrudan etkiler.

Supap zamanlaması genellikle krank mili referans alınarak dört temel olay üzerinden değerlendirilir:

- Emme Supabı Açılması (IVO – Intake Valve Opening): Emme supabı genellikle Üst Ölü Nokta (TDC)'dan hemen önce ya da sonra açılır. Bu, silindirin aşağı doğru hareketiyle birlikte dışarıdan hava (veya hava-yakıt karışımı) girişini başlatır.
- Emme Supabı Kapanması (IVC – Intake Valve Closing): Genellikle Alt Ölü Nokta (BDC)'dan sonra kapanır. Amaç, silindir içine daha fazla kütle çekilmesini sağlamak için piston yukarı çıkarken bir miktar daha açık kalmaktır (ram effect).
- Egzoz Supabı Açılması (EVO – Exhaust Valve Opening): Yanma sona ermeden önce, piston aşağı inerken açılır. Bu durum, egzoz gazlarının tahliyesine erken başlanmasını ve silindirin daha verimli boşalmasını sağlar.
- Egzoz Supabı Kapanması (EVC – Exhaust Valve Closing): Genellikle TDC'den sonra kapanır. Bu olay, egzoz gazlarının dışarı çıkışını tamamlar ve yeni çevrime geçişi başlatır.
- Supap Bindirmesi (Valve Overlap): TDC sırasında, emme ve egzoz supaplarının eş zamanlı açık olduğu kısa bir zaman aralığı vardır. Bu duruma supap bindirmesi (valve overlap) denir. Egzoz gazlarının atılmasını hızlandırmak ve emme stroğunu iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Ancak bindirme süresi iyi ayarlanmazsa, geri kaçış (reversion) veya taze karışım kaybı olabilir.

Tek silindirli motorlar, çok silindirli sistemlere göre daha az kompleks olsa da;

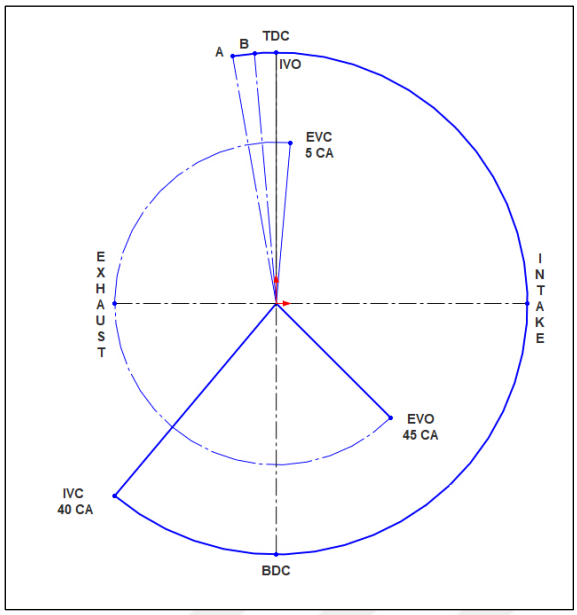
- Tüm çevrim tek bir silindirde gerçekleştiği için zamanlama hatalarının motor performansına etkisi daha büyüktür.

- Titreşim ve dengesizlik eğilimi yüksek olduğu için valf zamanlamasının senkronizasyonu çok önemlidir.
- Yanıt süresi ve dönüş momenti, doğrudan valf olaylarına bağlıdır.

4.3.1. Supap Zamanlamasının Performansa Etkisi

- Erken Emme Supabı Kapanması (EIVC): Düşük devirde verimi artırır, yüksek devirde kütle akışını sınırlar.
- Geç Emme Supabı Kapanması (LIVC): Yüksek devirde daha fazla dolum sağlar, düşük devirde geri kaçışı artırabilir.
- Geç Egzoz Supabı Açılması (LEVO): Yanma sonuna kadar basınç tutulur, ancak egzoz stroğu verimsiz olabilir.
- Erken Egzoz Supabı Açılması (EEVO): Egzoz atımı hızlanır ancak yanma basıncı erken kaybedilir.
- Geleneksel motorlarda sabit kam profili nedeniyle zamanlama her motor devrinde aynı kalır. Ancak gelişmiş sistemlerde:
- VVT (Variable Valve Timing) ile supap olaylarının krank mili pozisyonuna göre dinamik olarak ayarlanması mümkündür.
- Elektromekanik Supap Sistemleri (ESM) ise, supap kaldırma profili, zamanlaması ve açık kalma süresi gibi parametreleri her çevrim için elektronik olarak bağımsız kontrol etme olanağı sunar.

Tek silindirli motorlarda supap zamanlaması, motorun dolum verimi, yanma karakteristiği ve emisyon performansı açısından belirleyici bir parametredir. Sabit zamanlamalı kam sistemlerine karşılık, günümüzde değişken zamanlamalı sistemler ve elektromekanik supap teknolojileri sayesinde daha hassas, uyarlanabilir ve verimli valf kontrolü sağlanabilmektedir. Şekil 4.6'da çalışmada kullanılan motorun valf zamanlaması verilmiştir. Bu zamanlama diyagramı, supapların açılma ve kapanma açılarını krank mili konumuna göre göstermekte; böylece dolum, sıkıştırma, yanma ve egzoz fazlarının her birinde supap hareketlerinin nasıl gerçekleştiğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu bilgi, motorun hem deneysel analizlerinde hem de modelleme çalışmalarında temel bir referans noktası olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.6. Honda GX390 Valf Zamanlaması (Aygül ve diğ., 2019)

4.4. Elektromekanik Supap Mekanizması (ESM) ile Yapılan Deney Sonuçları

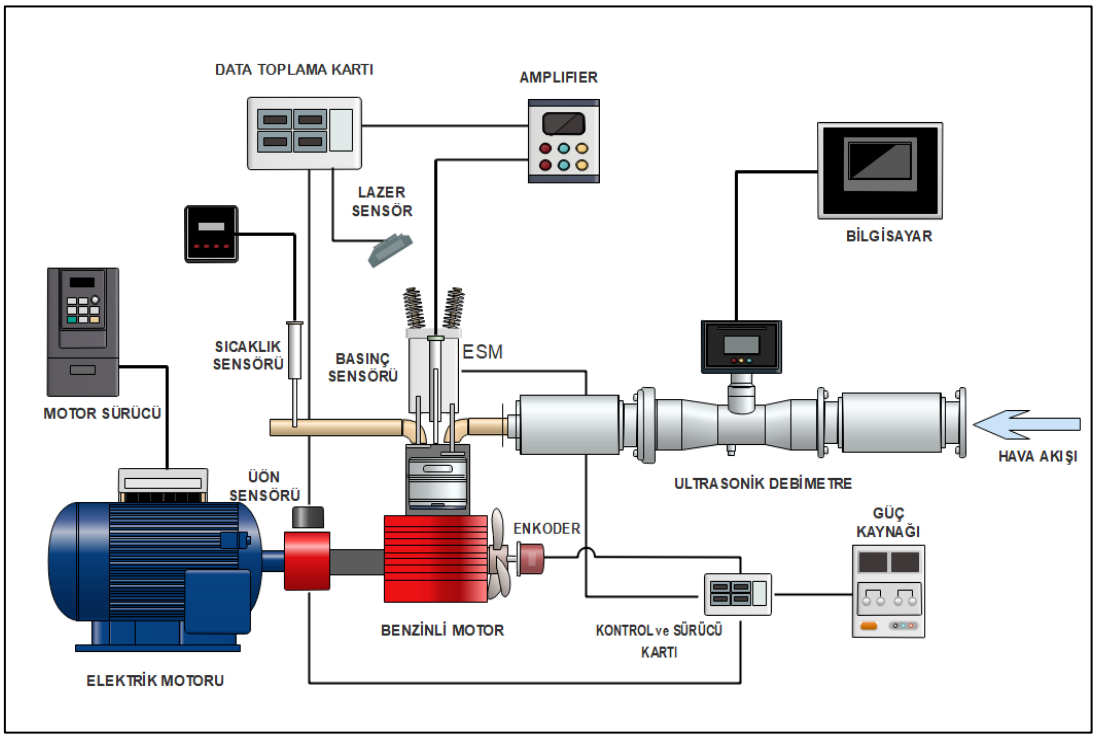
Klasik supap mekanizmasıyla gerçekleştirilen testlerin ardından, içten yanmalı motorda yer alan geleneksel kam mekanizması sökülmüş ve yerine tasarlanan elektromekanik supap (ESM) sistemi entegre edilmiştir. Ardından, klasik sistemle gerçekleştirilen test prosedürleri, ESM ile aynı koşullar altında tekrar edilmiştir. Bu aşamada, özellikle emme supabının açılma ve kapanma zamanlamalarının değiştirilmesinin, motorun volümetrik verimi ve silindir içi basınç karakteristikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. ESM'nin zamanlama esnekliği sayesinde farklı valf stratejileri uygulanmış ve bu stratejilerin motor performansına etkileri analiz edilmiştir.

ESM ile gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmalar her biri en az üç kez tekrar edilerek, deneysel güvenilirlik sağlanmış; elde edilen sonuçlar, tekrarlı ölçümler üzerinden ortalama alınarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.7 'de ESM kullanılan test sistemi gösterilmiştir. Düzenek, tahrik sistemi, test motoru, elektromekanik supap mekanizması, sensörler, kontrol birimleri ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır.

Tahrik sistemi, benzinli test motorunu farklı devirlerde döndürmek amacıyla kullanılan elektrik motoru ve motor sürücüsünden oluşmaktadır. Elektrik motoru, motor sürücüsü üzerinden kumanda edilmekte ve test motoruna krank mili üzerinden tahrik

sağlamaktadır. Bu sayede motor farklı devirlerde çalıştırılabilmekte ve supap sistemi üzerindeki yükler simüle edilebilmektedir.

Test motoru üzerine elektromekanik supap mekanizması (ESM) monte edilmiştir. Geleneksel kam mili mekanizmasının yerine geçen bu sistem, aktüatörler yardımıyla supapların açılıp kapanmasını sağlanmıştır. Supap hareketleri, lazer sensör ile anlık olarak izlenmekte ve veri toplama sistemine aktarılmaktadır. Ayrıca yanma odasındaki basınç değerlerini ölçmek için basınç sensörü ve pistonun konumunu referanslamak amacıyla üst ölü nokta (ÜÖN) sensörü kullanılmıştır. Motorun hava emiş sistemine bağlanan ultrasonik debimetre, motora giren hava miktarını hassas olarak ölçmekte ve supap zamanlamasının dolum verimi üzerindeki etkilerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Krank miline bağlı enkoder ise açısal konum bilgisini sağlamaktadır. Supapların çalıştırılması için gerekli enerji, güç kaynağı ve kontrol/sürücü kartı üzerinden sağlanmaktadır. Kontrol kartı, elektromekanik supaplara gönderilecek akım ve gerilim değerlerini ayarlayarak farklı açılma-kapanma stratejilerinin uygulanmasına olanak vermektedir. Sonuç olarak, bu deney düzeneği sayesinde elektromekanik supap mekanizmasının enerji tüketimi, zamanlama doğruluğu ve motor performansına etkileri ayrıntılı olarak incelenebilmektedir.



Şekil 4.7. ESM'li Test Düzeneği

4.4.1. Emme Supabı Profili

Elektromekanik supap (ESM) sisteminin klasik mekanik supap sistemine kıyasla temel avantajlarından biri, emme supabı profilinin daha geniş bir zaman aralığına yayılabilmesidir. Bu sayede, emme zamanında silindir içerisine alınan hava miktarının artırılması ve dolayısıyla volümetrik verimin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Daha yüksek volümetrik verim, motorun hem güç hem de tork üretimini olumlu yönde etkilerken, aynı zamanda yakıt ekonomisine ve emisyon değerlerine de doğrudan katkı sağlamaktadır.

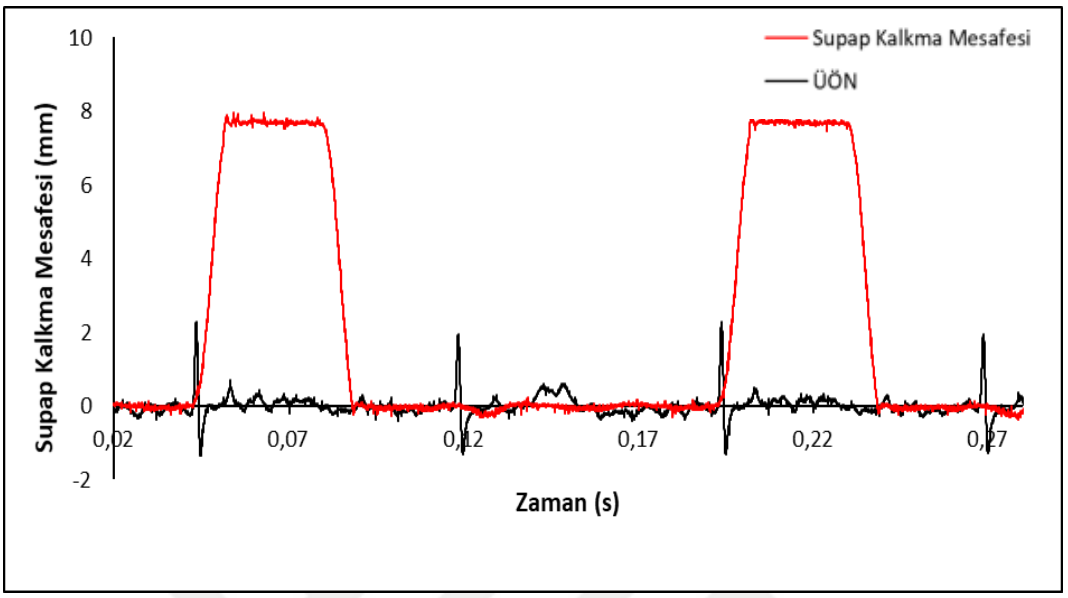
ESM sistemlerinin performansını etkileyen en kritik parametrelerden biri, supap açılma süresidir. Bu süre; bobinlerin endüktans değeri, supap kalkma mesafesi (lift), bobinden geçen akım, yay kuvveti ve bobinlerde oluşan elektromanyetik çekme kuvveti gibi değişkenlerin bileşimine bağlıdır. Bu parametrelerin birlikte optimize edilmesi, supapların istenilen sürelerde açılıp kapanmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Özellikle yüksek devir koşullarında supap açılma süresinin milisaniyeler seviyesinde hassas şekilde kontrol edilebilmesi, ESM sistemlerinin başarısını belirleyen en önemli faktörlerden biridir.

Bu tez çalışmasında kullanılan motorun silindir kapağındaki fiziksel kısıtlamalar nedeniyle bobin çapı en fazla 38 mm olarak belirlenmiştir. Bu sınır dahilinde geliştirilen optimum ESM tasarımında, supap açılma süresi 7,8 mm'lik lift mesafesi için 7,7 milisaniye olarak ölçülmüştür. Açılma süresinin daha da kısaltılması, supap profilinin genişlemesine katkı sağlayarak silindire daha fazla hava alınmasına olanak tanıyacaktır.

Supap açılma süresini azaltmak amacıyla elektromanyetik kuvvetin artırılması gerekmektedir. Bu da doğrudan bobin sarım sayısının artırılmasıyla mümkün olabilmektedir. Öte yandan, ESM sisteminde hareketli elemanın kütlesi de sistem dinamiği açısından önem arz etmektedir. Geliştirilen prototipte hareketli kütle 102 gram olarak belirlenmiştir.

Supap hızını etkileyen bir diğer önemli unsur ise yataklama sistemindeki problemler ve mekanik sürtünme kayıplarıdır. Bu tür kayıpların minimuma indirilmesi, supap hareketinin daha hızlı ve kararlı gerçekleşmesine katkı sağlayacak; böylece sistemin

yüksek devirlerdeki performansı iyileştirilecektir. Şekil 4.8'de 800 dev/dk'daki klasik sistem ESM emme supabı profili gösterilmiştir.



Şekil 4.8. 800 dev/dk'daki ESM Sistemin Zamana Bağlı Emme Supabı Profili

4.4.2. ESM ile 800 dev/dk'daki Test Sonuçları

Klasik mekanik supap sistemine kıyasla, elektromanyetik supap mekanizması (ESM) ile elde edilen emme supabı profilleri incelendiğinde, supap açıklık alanında anlamlı bir artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, silindir içine alınan hava miktarını artırarak yanma verimliliğini olumlu yönde etkileme potansiyeli sunmaktadır. ESM'nin bu avantajını daha ayrıntılı değerlendirebilmek amacıyla, emme supabının açılma zamanları üst ölü noktadan (ÜÖN) sırasıyla 5 ve 10 krank mili açısı (KMA) öncesine çekilerek ek testler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan bu testler sonucunda, ortalama hava tüketimi, maksimum silindir iç basıncı, çevresel hava koşulları (sıcaklık, basınç, nem) ile emme ve egzoz havası sıcaklıkları detaylı biçimde kaydedilmiştir. Elde edilen deneysel bulgular, Tablo 4.5'de özetlenmiştir. Bu veriler ışığında, ESM'nin düşük motor devirlerinde dahi klasik sistemlere kıyasla daha etkin bir emme süreci sağladığı ve motor performansı üzerinde doğrudan etkili olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 4.5. ESM'li Sistemin 800 dev/dk'daki Test Sonuçları

Devir / Supap	Pmax	Emme	Egzoz	Hava Debisi kg/h	Nem	P_0
800 ESM	7,5	21,7	28,2	7,737	47,8	957
800 ESM ÜÖNÖ 5 KMA	7,4	21,9	27,6	7,643	46,1	958
800 ESM ÜÖNÖ 10 KMA	7,2	21,7	28,8	7,499	41,2	959

Gerçekleştirilen deneysel analizler doğrultusunda, 800 dev/dk motor devrinde klasik supap mekanizması ile ölçülen ortalama hava tüketimi 7,446 kg/h olarak belirlenmiştir. Aynı test koşullarında elektromanyetik supap mekanizması (ESM) kullanıldığında bu değer 7,737 kg/h olarak tespit edilmiştir. Test sırasında, ortam hava sıcaklığı, nem oranı ve atmosferik basınç gibi çevresel faktörler de göz önünde bulundurularak hava yoğunluğu 1,128 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, motor performansını daha doğru bir şekilde değerlendirmek için önemlidir. Elde edilen bu yoğunluk verisi, yapılan tüm hesaplamaların doğruluğu açısından kritik bir rol oynamaktadır.

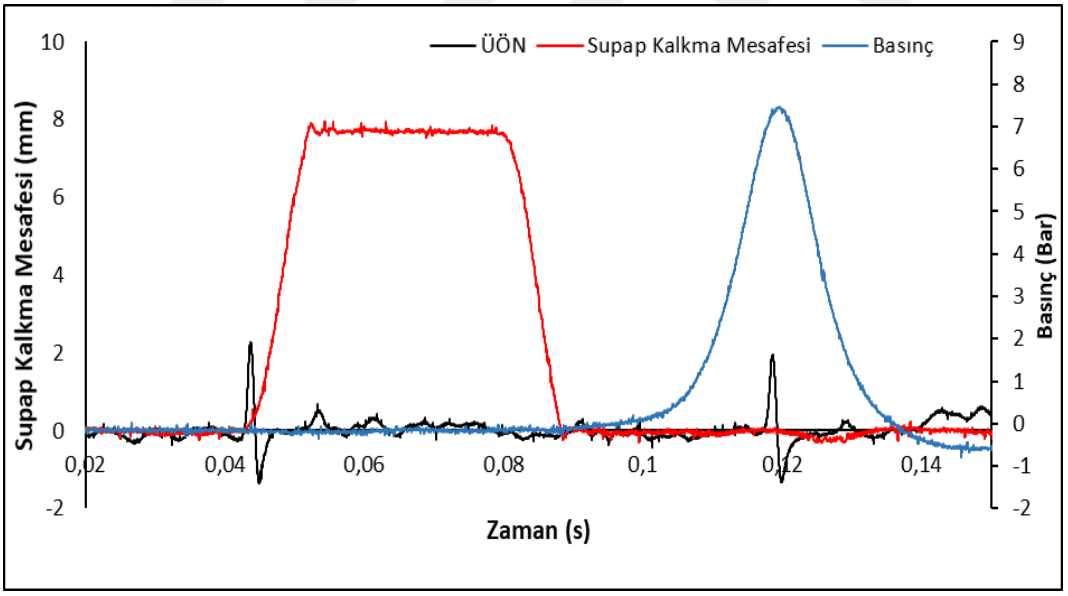
Bu veriler ışığında yapılan hesaplamalar sonucunda, klasik supap sistemi için volümetrik verim oranı %73,5 olarak bulunmuştur. Volümetrik verim, motorun silindire ne kadar hava alabileceğini ve dolayısıyla motorun ne kadar verimli çalışacağını gösteren önemli bir parametredir.

ESM ile gerçekleştirilen supap zamanlamalarında ise, emme supabının üst ölü noktadan (ÜÖN) 5 KMA önce açılması durumunda volümetrik verim %72,6 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, klasik sistemin volümetrik veriminden %0,9 daha düşük olsa da ESM'nin zamanlama değişiklikleri ile verimlilik açısından sağladığı potansiyel artışı gösteren önemli bir bulgudur. ÜÖN'dan 10 KMA önce açıldığında ise bu verim %71,2'ye düşmüştür. Bu düşüş, zamanlamadaki aşırı erken açılmanın verimliliği nasıl olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak yine de bu değerler, ESM'nin belirli zamanlama değişiklikleri ile klasik sisteme göre önemli bir verim artışı sağlayabileceğini göstermektedir. ESM'nin maksimum verim artışı, klasik sistemle karşılaştırıldığında %3,5 civarında bir iyileşme sağlamaktadır. Bu da elektromanyetik supap mekanizmasının potansiyel olarak motor performansını artıran bir teknolojik gelişme olduğunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca, silindir içi basınç analizleri de bu süreçte önemli bilgiler sunmaktadır. ESM uygulaması ile yapılan testlerde, klasik zamanlamaya kıyasla silindir içindeki basıncın ortalama 0,5 bar arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, ESM'nin motor içindeki hava akışını daha verimli hale getirerek, yakıtın daha etkili bir şekilde yanmasını sağlayabileceğini ve dolayısıyla motorun genel verimliliğini artırabileceğini göstermektedir.

Emme supabının ÜÖN'dan 5 KMA önce açıldığı senaryo için zamana bağlı olarak elde edilen ÜÖN, supap profili ve silindir iç basınç değişimlerini gösteren grafik, Şekil 4.9'da sunulmuştur. Bu grafik, motor içindeki hava hareketlerini ve basınç dalgalanmalarını detaylı bir şekilde görselleştirerek, ESM'nin zamanlama varyasyonlarının motor performansı üzerindeki etkilerini daha somut bir şekilde ortaya koymaktadır.

Elektromekanik supap mekanizmasının, özellikle volümetrik verimlilik ve silindir basınç profilindeki iyileştirmeler ile motor performansını artırma potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, supap zamanlamasının motor verimliliği üzerindeki etkileri dikkatli bir şekilde optimize edilmelidir.



Şekil 4.9. ESM'li Sistemin 800 dev/dk'daki Zamana Bağlı ÜÖN, Supap Profili ve Silindir İçi Basınç Grafiği

4.4.3. ESM ile 1200 dev/dk'daki Test Sonuçları

1200 dev/dk'da gerçekleştirilen test sonuçları Şekil 4.10 ve Tablo 4.6'da detaylı biçimde sunulmuştur. Elde edilen verilere göre, klasik mekanik supap zamanlama sistemi ile

çalışan motorda ortalama hava tüketimi 10,234 kg/h olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, elektromanyetik supap mekanizması kullanıldığında, hava tüketiminde belirgin bir artış gözlemlenmiş ve bu değer 11,165 kg/saat seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, ESM'nin sunduğu değişken supap zamanlaması ve supap kaldırma yüksekliği kontrolü sayesinde, silindirlere daha fazla havanın alınabildiğini ortaya koymaktadır.

Deney süresince ölçülen çevresel koşullar dikkate alınarak, emilen havanın yoğunluğu 1,14 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu yoğunluk değeri, volümetrik verim hesaplamalarında temel bir parametre olarak kullanılmıştır. Klasik supap mekanizmasıyla çalışan sistemde, bu değerlere bağlı olarak volümetrik verim %69,9 olarak belirlenmiştir. ESM ile elde edilen yüksek hava kütle akışı, volümetrik verimliliği artırarak yanma odasına daha fazla oksijen taşınmasını sağlamıştır. Bu durumun yanma kalitesinin iyileşmesine destek olacağı anlaşılmaktadır.

Emme supabının açılma zamanlamasının Üst Ölü Nokta (ÜÖN)'dan 5° KMA (Krank Mili Açısı) ve 10° KMA önceye alınması durumları da analiz edilmiştir. Bu zamanlamaların etkisiyle volümetrik verimlilik sırasıyla %69,1 ve %68,2 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgu, emme zamanlamasının erken ayarlanmasının silindire giren hava miktarını sınırlayarak volümetrik verimi düşürdüğünü göstermektedir. Çünkü supap daha erken açıldığında, silindirin iç basıncı ile emme manifoldu basıncı arasındaki fark azalarak, hava girişinin yeterince hızlanamamasına ve dolayısıyla hava dolumunun verimsiz gerçekleşmesine neden olmuştur.

ESM'nin klasik sistemle karşılaştırıldığında sunduğu avantajlar yalnızca hava tüketimi ve volümetrik verimle sınırlı kalmamaktadır. Silindir içi basınç ölçümleri sonucunda, ESM kullanılan motorda maksimum silindir içi basıncın klasik sistemle elde edilene göre yaklaşık 0,6 bar daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu artış, silindir içine alınan hava miktarındaki artışın daha verimli bir yanma süreci ile sonuçlanacağını, dolayısıyla motorun termodinamik veriminde iyileşme sağlanabileceğini göstermektedir.

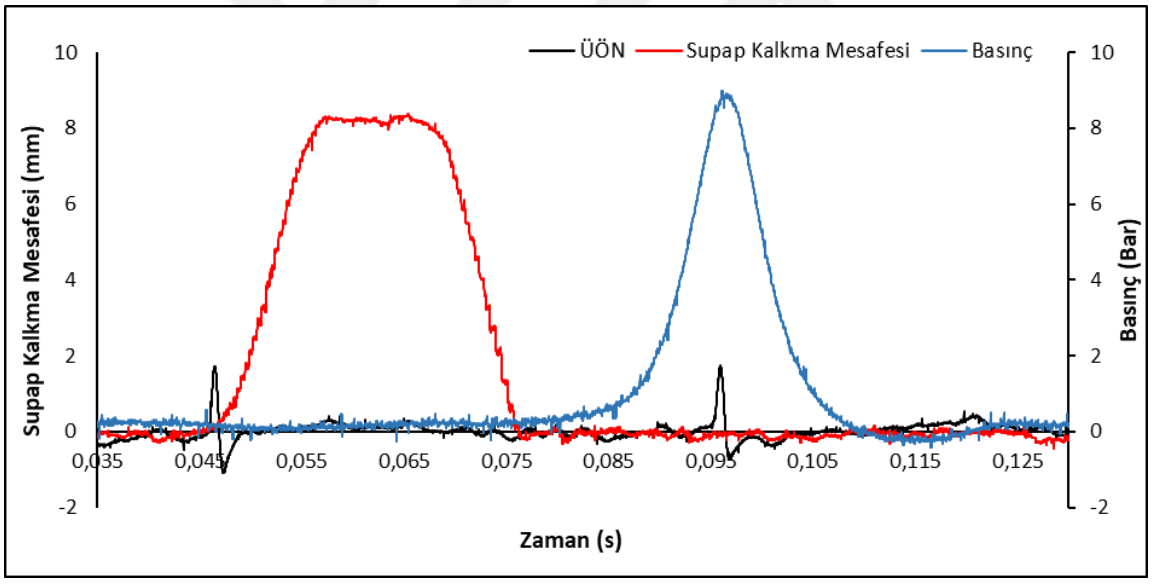
Ek olarak, Şekil 4.10'da 1200 dev/dk motor hızında elde edilen emme supap profili ve silindir içi basınç değerleri gösterilmiştir. Bu grafik, farklı zamanlama stratejilerinin supap hareketi ve silindir basıncı üzerindeki etkilerini zamana bağlı olarak karşılaştırmalı

şekilde göstermekte ve ESM'nin motor dinamiklerine getirdiği katkıyı açık bir biçimde ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, 1200 dev/dk'da ESM uygulamasının klasik supap mekanizmasına kıyasla hem hava dolumu hem de yanma kalitesi açısından önemli kazanımlar sağladığı ortaya konmuştur. Bu kazanımlar, motorun genel performansını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda daha düşük emisyon seviyelerine ulaşılmasında da önemli rol oynayabilecek potansiyele sahiptir.

Tablo 4.6. ESM ile1200 dev/dk'daki test sonuçları

Devir	Pmax	Emme	Egzoz	Hava Debisi	Nem	P_0
1200 ESM	9,4	21,9	33,7	11,165	35,0	967
1200 ESM ÜÖNÖ 5 KMA	9,2	21,1	33,1	11,046	34,7	967
1200 ESM ÜÖNÖ 10 KMA	8,9	20,8	33,2	10,897	35,1	967



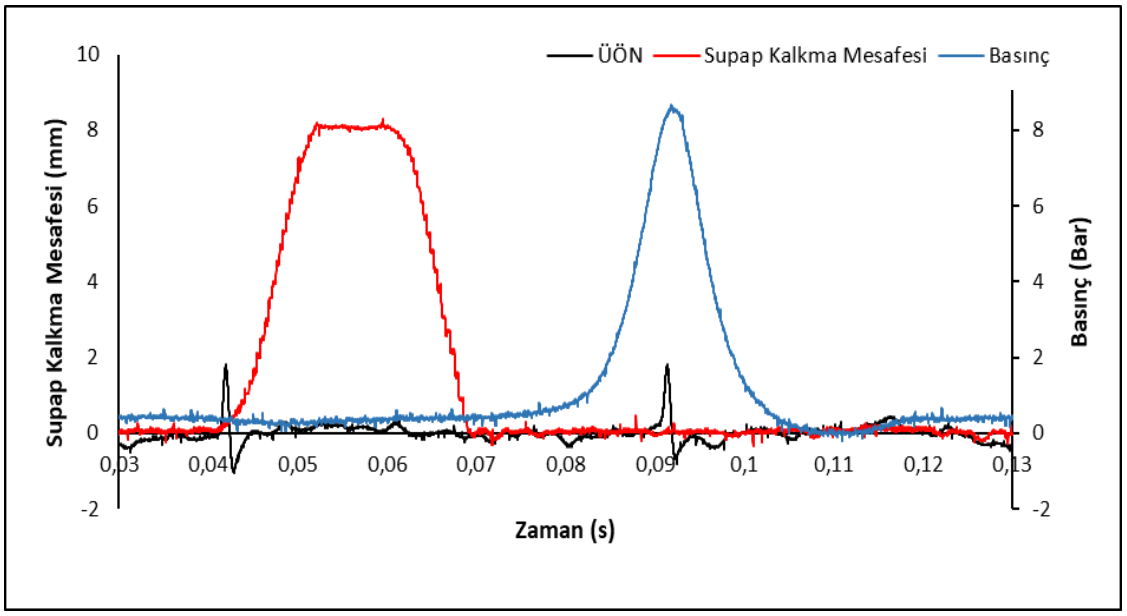
Şekil 4.10. ESM'li sistemin 1200 dev/dk'da zamana bağlı ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

1200 devir/dakika motor hızında gerçekleştirilen testlerde, emme supabının kapanma zamanlaması klasik (standart) ayara kıyasla 15° krank mili açısı (KMA) daha erken olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu modifikasyon sonucunda, silindir içerisine alınan ortalama hava kütlesi 11,311 kg/saat olarak ölçülmüştür. Bu değer, klasik zamanlamaya göre belirgin bir artışı ifade etmektedir ve silindire alınan hava miktarındaki bu yükselme, volümetrik verimliliğin %70,9 seviyesine ulaşmasını sağlamıştır.

Elde edilen sonuçlar, emme supabının daha erken kapatılmasıyla birlikte pistonun emme zamanının sonuna doğru gerçekleştirdiği yukarı hareket sırasında, geri akışın minimize edildiğini ve dolayısıyla emme havasının silindir içerisinde daha etkili tutulabildiğini göstermektedir. Bu durum, özellikle düşük ve orta devir aralıklarında volümetrik verim açısından avantaj sağlamaktadır.

Buna ek olarak, silindir içi maksimum basınç değerleri de analiz edilmiştir. Klasik zamanlama ile karşılaştırıldığında, erken kapanma stratejisi ile çalıştırılan motor konfigürasyonunda maksimum silindir içi basınçta yaklaşık 0,2 bar'lık bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, silindir içerisine alınan hava miktarındaki iyileşmenin dolayısıyla yanma odasındaki basıncın daha yüksek seviyelere ulaşabildiğini göstermektedir. Zamana bağlı olarak supap profili, Üst Ölü Nokta (ÜÖN) ve silindir içi basınç değerlerinin değişim Şekil 4.11'da sunulmaktadır.

Bu bulgular, supap zamanlamasında yapılacak optimizasyonların yalnızca volümetrik verimi değil, aynı zamanda yanma kalitesini ve motorun genel performans karakteristiklerini de önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle elektromekanik supap kontrol sistemleri ile bu tür stratejik zamanlama değişikliklerinin esnek biçimde uygulanabilmesi, içten yanmalı motorların daha yüksek verimlilikle çalıştırılabilmesi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır.



Şekil 4.11. ESM 'li sistemin 1200 dev/dk'da emme supabı kapanma zamanı standart zamanlamaya göre 15 KMA öne çekilerek elde edilen supap profili

4.4.4. ESM ile 1600 dev/dk'daki Test Sonuçları

Tablo 4.7'de sunulan verilere göre, 1600 dev/dk motor devrinde klasik supap sistemi ile yapılan testlerde ortalama hava tüketimi 13,218 kg/h olarak ölçülürken, elektromekanik supap (ESM) sistemi ile bu değer 13,976 kg/h'ye yükselmiştir. Testlerin gerçekleştirildiği ortam koşullarında havanın yoğunluğu 1,144 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, ESM sistemi ile elde edilen volümetrik verim %66,2 olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca, emme supabının Üst Ölü Nokta (ÜÖN)'dan önce açılma zamanlamasının volümetrik verim üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Emme supabının 5 krank mili açısı (KMA) önce açılması durumunda volümetrik verim %64,9, 10 KMA önce açılması durumunda ise %64,1 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, erken açılmanın her zaman volümetrik verimi artırmadığını, hatta belirli bir sınırın ötesinde sistem verimliliğini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

Klasik sistem ile karşılaştırıldığında, ESM kullanımı sayesinde volümetrik verimde yaklaşık %4,1'lik bir artış sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, silindir içi maksimum basınç değerlerinde de klasik sisteme kıyasla yaklaşık 0,3 bar artış elde edilmiştir. Bu bağlamda, Şekil 4.12'de 1600 dev/dk motor devrinde zamana bağlı olarak emme supabının ÜÖN'a göre konumu, supap açıklık profili ve silindir içi basınç değişimi birlikte grafiksel olarak sunulmuştur.

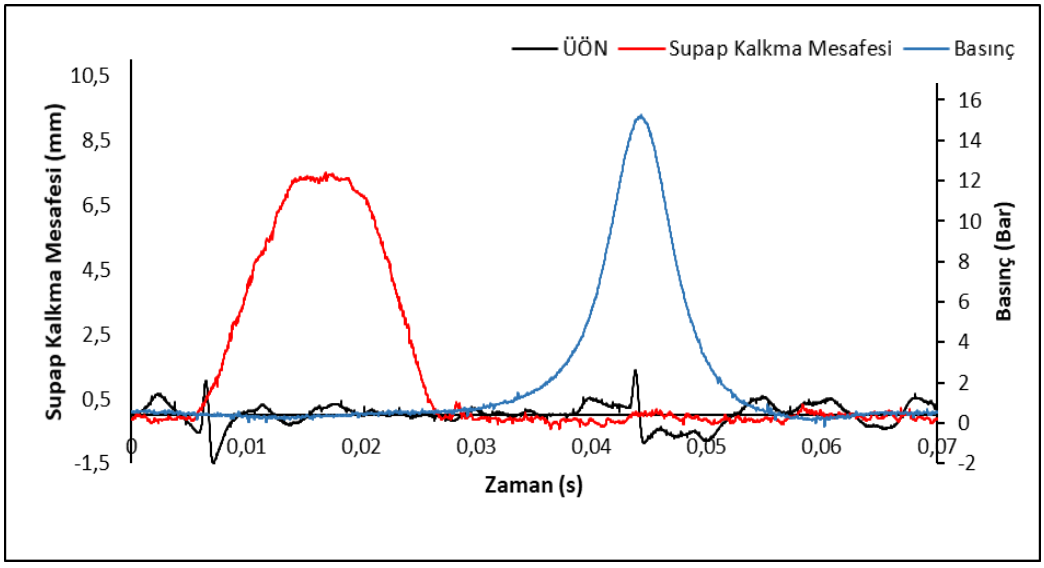
Yapılan test sonuçları, mevcut literatürde elektromekanik supap sistemlerinin (ESM) sunduğu avantajlara dair daha önceki çalışmalarla büyük ölçüde örtüşmektedir. Örneğin, Zhao ve ark. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, ESM sisteminin düşük ve orta motor devirlerinde volümetrik verimliliği %3 ila %6 arasında artırabildiği rapor edilmiştir. Benzer şekilde, Müller ve ekibi (2021), ESM sisteminin özellikle değişken zamanlama stratejilerinde klasik mekanizmalara göre daha stabil hava dolumu sağladığını ve bu sayede silindir içi yanmanın daha kontrollü gerçekleştiğini belirtmiştir.

Bu çalışma kapsamında 1600 dev/dk'da elde edilen %4,1'lik volümetrik verim artışı, söz konusu literatürle tutarlıdır ve ESM sisteminin değişen motor devri ve yük koşullarında daha etkin çalıştığını doğrular niteliktedir. Ayrıca, silindir içi maksimum basınç

değerindeki artış da daha verimli bir enerji dönüşüm süreciyle doğrudan ilişkilidir; bu da önceki araştırmalarda belirtilen ESM'nin yanma kalitesine olan olumlu etkilerini desteklemektedir. Motor performans parametrelerinin motor haritası üzerinden değerlendirilmesi, test sonuçlarının daha geniş bir işletme aralığında yorumlanmasına olanak tanır. 1200 ve 1600 dev/dk gibi orta devir bandında yapılan ölçümler, genellikle şehir içi sürüş koşullarına karşılık gelen yük aralıklarını temsil etmektedir. Bu koşullarda volümetrik verimlilikte sağlanan artış, özellikle düşük yükte çalışan motorlarda yakıt ekonomisini ve emisyon kontrolünü doğrudan etkilemektedir. ESM sisteminin, düşük yükte erken supap kapanışı (Early Intake Valve Closing- EIVC) ve yüksek yükte geç kapanış (Late Intake Valve Closing - LIVC) stratejilerini esnek biçimde uygulayabilme özelliği, motor haritasının farklı bölgelerinde optimal yanma koşullarının sağlanmasına olanak tanımaktadır. Dolayısıyla, elde edilen test sonuçları, yalnızca sabit devirli çalışma için değil, değişken sürüş koşullarına sahip gerçek motor kullanımı açısından da değerlendirildiğinde anlamlı olduğu görülmektedir.

Tablo 4.7. 1600 dev/dk'daki test sonuçları

Devir	Pmax	Emme	Egzoz	Hava Debisi	Nem	P_0
1600 ESM	15,9	20,7	31,8	14,159	36,1	967
1600 ESM ÜÖNÖ 5 KMA	15,7	20,9	32,1	13,872	35,5	967
1600 ESM ÜÖNÖ 10 KMA	15,6	21,0	32,0	13,713	35,4	967



Şekil 4.12. ESM ile1600 dev/dk'da zamana bağlı ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

4.4.5. ESM ile 2000 dev/dk'daki Test Sonuçları

2000 dev/dk motor devrinden itibaren, elektromekanik supap (ESM) sistemiyle elde edilen supap açıklık profili, klasik supap mekanizmasıyla elde edilen profile büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Ancak, daha yüksek motor devirlerinde ESM sisteminde supap açılma hızı kritik bir parametre haline gelmektedir. Supabın daha hızlı açılması, supap profilinin genişlemesine ve buna bağlı olarak silindir içerisine daha fazla hava alınmasına olanak tanımaktadır. Bu da doğrudan volümetrik verimin artmasını sağlamaktadır.

Bu kapsamda yapılan testlerin sonuçları Tablo 4.8'de sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre, klasik sistemde ortalama hava tüketimi 19,294 kg/h olarak ölçülmüşken, ESM ile bu değer 19,073 kg/h olarak belirlenmiştir. Testlerin yapıldığı çevresel koşullarda havanın yoğunluğu 1,1271 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu verilere dayanarak yapılan hesaplamalar sonucunda, ESM için volümetrik verim %72,9 olarak bulunmuştur. Ayrıca, emme supabının Üst Ölü Nokta (ÜÖN)'dan önce açılmasının volümetrik verime etkisi de değerlendirilmiştir. Supabın 5 krank mili açısı (KMA) önce açılması durumunda volümetrik verim %71,5, 10 KMA önce açıldığında ise %71,2 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, önceki devir analizleriyle tutarlı olarak, erken açılmanın belirli bir noktadan sonra verimi olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

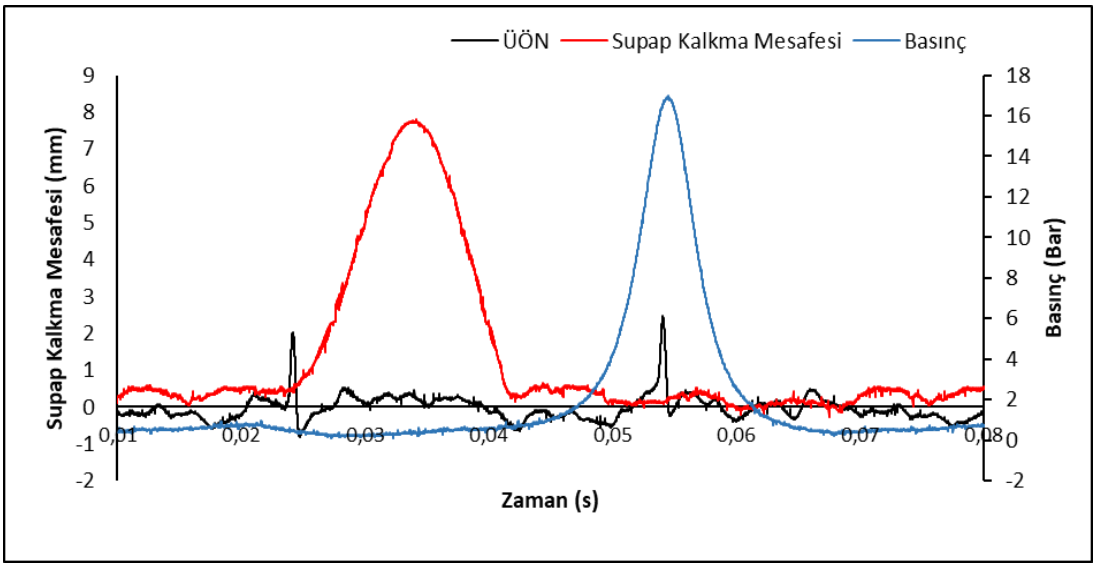
Genel olarak değerlendirildiğinde, elektromekanik supap (ESM) sistemi ile klasik mekanik supap sistemi arasında elde edilen volümetrik verim sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, ESM sisteminin silindir içerisine alınan hava miktarı açısından geleneksel sistemlerle benzer bir performans ortaya koyduğunu göstermektedir. Ancak, ayrıntılı karşılaştırmalar incelendiğinde silindir içi maksimum basınç değerlerinde dikkate değer bir farklılık gözlenmiştir. Özellikle, ESM kullanılan durumda klasik sisteme kıyasla yaklaşık 0,3 bar'lık bir artış elde edilmiştir.

Bu artış, doğrudan yanma sürecinin daha etkin gerçekleştiğine işaret etmektedir. Daha yüksek maksimum basınç, silindir içerisinde daha homojen karışımın, daha doğru zamanlamayla ve daha verimli bir şekilde yandığını göstermekte; bu da ısıl verimin yükselmesine katkı sağlamaktadır. Ayrıca, maksimum basınç değerlerindeki artış, motorun potansiyel güç üretim kapasitesini de olumlu yönde etkilemektedir.

Şekil 4.13'te, 2000 dev/dk motor devrinde zaman eksenine bağlı olarak emme supabının ÜÖN'a göre konumu, supap açıklık profili ve silindir içi basınç değişimi birlikte grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.8. 2000 dev/dk'daki test sonuçları

Devir / Supap	Pmax	Emme	Egzoz	Hava Debisi	Nem	P_0
2000 ESM	16,8	23,8	36,3	19,073	33,4	962
2000 ESM ÜÖNÖ 5 KMA	16,7	24,2	37	18,821	36,7	962
2000 ESM ÜÖNÖ 10 KMA	16,6	23,5	36,4	18,737	35,7	962



Şekil 4.13. ESM ile 2000 dev/dk'da zamana bağlı ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

4.4.6. ESM ile 2400 dev/dk'daki Test Sonuçları

2400 devir/dakika motor hızında gerçekleştirilen testler kapsamında elde edilen sonuçlar, klasik supap mekanizmasıyla elde edilen verilerle büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Yapılan ölçümlerde, klasik sistemle çalışan motor konfigürasyonunda ortalama hava tüketimi 28,797 kg/h olarak belirlenmiştir. Elektromekanik supap mekanizması (ESM) kullanıldığında ise bu değer 28,992 kg/h olarak ölçülmüştür. Bu küçük fark, yüksek devirlerde ESM'nin sunduğu supap zamanlaması esnekliğinin silindir içi hava dolumu üzerinde sınırlı ancak tutarlı bir iyileştirme sağladığını ortaya koymaktadır.

Deneyler sırasında ölçülen çevresel koşullar dikkate alınarak, havanın yoğunluğu 1,1307 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu veriler temel alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, ESM sistemi ile elde edilen volümetrik verimlilik %91,5 olarak bulunmuştur. Bu değer, içten yanmalı motorlar için oldukça yüksek bir dolum verimliliğine işaret etmektedir ve ESM'nin özellikle yüksek devirli çalışma koşullarında da etkinliğini koruduğunu göstermektedir.

2400 dev/dk'da emme supabının Üst Ölü Nokta (ÜÖN)'dan önce açılmasının volümetrik verim üzerindeki etkisi de analiz edilmiştir. Supabın 5° krank mili açısı (KMA) erken açılması durumunda volümetrik verim %90,8**,** 10° KMA erken açıldığında ise %90,3 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, önceki devir analizleriyle tutarlı olarak, emme supabı açılma zamanının erkene alınması belirli bir noktadan sonra hava akışıyla piston hareketinin senkronizasyonunu bozarak, geri akışa neden olabileceğini ve bu nedenle silindir doluluğunu olumsuz etkileyebileceğini ortaya koymaktadır.

ESM ve klasik mekanizma karşılaştırıldığında, ESM'nin volümetrik verimde yaklaşık %1 oranında bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Her ne kadar bu artış düşük görünse de yüksek motor devirlerinde supap zamanlaması ve profilinde sağlanan küçük değişikliklerin performans üzerinde öneli etkiler yapabilmektedir. Ayrıca, silindir içi maksimum basınç değerlerinde de yaklaşık 0,2 bar'lık bir artış elde edilmiştir. Bu durum, ESM'nin daha hızlı ve optimize supap hareketi sayesinde daha etkili bir silindir dolumu sağladığını göstermektedir.

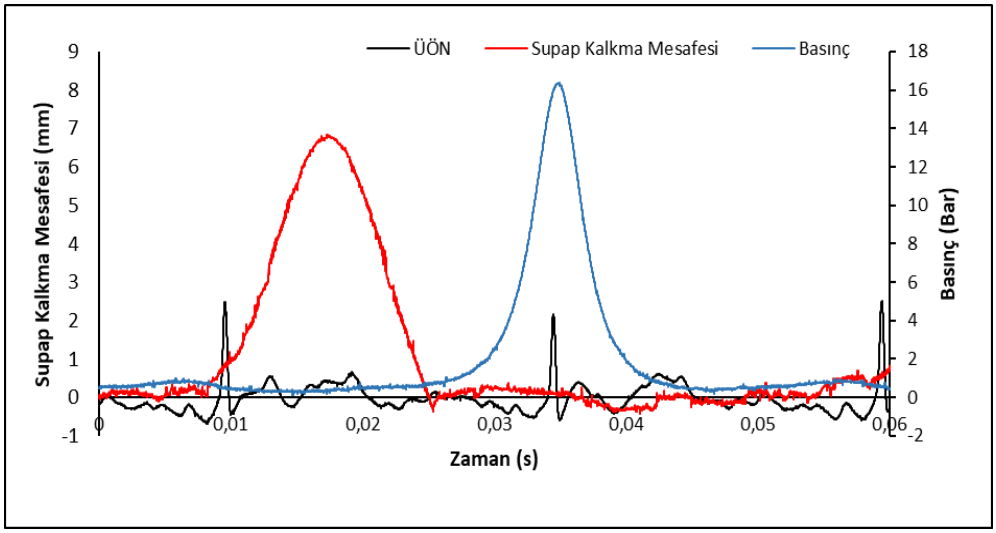
Şekil 4.14, 2400 dev/dak motor devrinde zaman eksenine bağlı olarak emme supabı profilini, ÜÖN referansına göre konumunu ve silindir içi basınç değişimini grafiksel olarak göstermektedir.

Ayrıca, 2400 dev/dak motor devrinde yapılan test sonuçları, elektromekanik supap sisteminin yüksek devir koşullarında da kararlı bir şekilde çalışabildiğini ve volümetrik verim üzerinde pozitif etkisini sürdürdüğünü göstermektedir. Elde edilen yaklaşık %1'lik verim artışı ve 0,2 bar'lık maksimum basınç yükselişi, klasik sistemlerin fiziksel sınırlamalarının ESM ile nasıl aşılabileceğine dair güçlü kanıtlar sunmaktadır. Özellikle yüksek devir ve yüksek yük bölgelerinde, ESM'nin sunduğu zamanlama ve supap kontrol esnekliği, motor performansının optimize edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu

bulgular, ESM teknolojisinin yalnızca düşük ve orta devirlerde değil, aynı zamanda yüksek devirli çalışma aralıklarında da etkin bir çözüm sunduğunu doğrulamakta ve gelecekte bu sistemlerin seri üretim motor teknolojilerinde daha yaygın kullanımına işaret etmektedir. Tablo 4.9'da 2400 dev/dk'daki çalışma koşulunda elde edilen deneysel veriler detaylı şekilde raporlanmıştır. 2400 dev/dak motor devrinde yapılan test sonuçları, elektromekanik supap sisteminin yüksek devir koşullarında da kararlı bir şekilde çalışabildiğini ve volümetrik verim üzerinde pozitif etkisini sürdürdüğünü göstermektedir. Elde edilen yaklaşık %1'lik verim artışı ve 0,2 bar'lık maksimum basınç yükselişi, klasik sistemlerin fiziksel sınırlamalarının ESM ile nasıl aşılabileceğine dair güçlü kanıtlar sunmaktadır. Özellikle yüksek devir ve yüksek yük bölgelerinde, ESM'nin sunduğu zamanlama ve supap kontrol esnekliği, motor performansının optimize edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bulgular, ESM teknolojisinin yalnızca düşük ve orta devirlerde değil, aynı zamanda yüksek devirli çalışma aralıklarında da etkin bir çözüm sunduğunu doğrulamakta ve gelecekte bu sistemlerin seri üretim motor teknolojilerinde daha yaygın kullanımına işaret etmektedir.

Tablo 4.9. 2400 dev/dk'daki test sonuçları

Devir / Supap	Pmax	Emme	Egzoz	Hava Debisi	Nem	P_0
2400 ESM	16,7	22,8	40,3	28,992	37,1	962
2400 ESM ÜÖNÖ 5 KMA	16,5	22,9	41,1	28,759	37	962
2400 ESM ÜÖNÖ 10 KMA	16,3	23,1	42,2	28,602	36,9	962



Şekil 4.14. ESM ile 2400 dev/dk'da zamana bağlı ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

Elektromekanik supap (ESM) sistemi ile 2400 dev/dk'nın ardından 2600 dev/dk motor devrinde testler gerçekleştirilmiş, ancak bu devirde klasik sistemdeki supap açık kalma süresinin 14,1 ms olması nedeniyle ESM, aynı supap açıklık zamanlamasını sağlayamamıştır. ESM sisteminde, supabın kapalı konumdan tam açık konuma geçme süresi 7,7 ms, kapanma süresi ise benzer şekilde 7,7 ms olarak ölçülmüştür. Bu durumda, supabın tam açılıp tekrar kapanması için geçen toplam süre 15,4 ms olmaktadır. Bu süre, klasik sistemdeki açık kalma süresinden daha uzun olduğundan, aynı zamanlama koşullarında ESM ile testlerin gerçekleştirilmesi mümkün olmamıştır. Ancak, emme supabının kapanma zamanlaması geciktirilerek sistemin çalışması sağlanabilmiştir. Yani, klasik sistemdeki zamanlama şartları birebir uygulanamasa da ESM sisteminin farklı bir zamanlama stratejisiyle çalışması mümkün olmuştur.

Bu kısıtlamalar nedeniyle, 2800 dev/dk ve 3000 dev/dk motor devirlerinde ESM sistemiyle testler gerçekleştirilmemiştir. Yüksek devirlerde supap zamanlamasına ilişkin bu sınırlama, ESM sisteminin mevcut konfigürasyonda yüksek devir performansını kısıtlayan bir etken olarak değerlendirilmiştir.

Mevcut test bulguları, ESM sisteminin yüksek motor devirlerinde performansını sınırlayan temel faktörün, supap hareket süresinin yetersizliği olduğunu ortaya koymuştur. Supabın bir çevrimde tam açılıp kapanması için gereken sürenin, krank mili dönüş hızına göre fazla olması, sistemin motor devrine ayak uydurmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, silindir dolum sürecinde gecikmeye ve dolayısıyla verim kaybına neden olmaktadır.

Yüksek devirlerde supap zamanlamasını etkin bir şekilde kontrol edebilmek için öncelikle aktüatörlerin tepkime süresi azaltılmalıdır. Bu bağlamda, elektromanyetik malzemelerin özellikleri, bobin tasarımı ve supap kütlesi gibi parametrelerde yapılacak iyileştirmeler ile ESM sisteminin dinamik performansı geliştirilebilir. Özellikle düşük ataletli ve yüksek geçirgenlikli malzeme kullanımı, açılma-kapanma sürelerinin düşürülmesine yardımcı olacaktır.

Buna ek olarak, yüksek frekanslı motor devrine sahip çalışma koşullarında, gerçek zamanlı çalışan ve supap fazlarını dinamik olarak ayarlayan kontrol algoritmalarının

kullanılması gereklidir. Bu tür algoritmalar, supap zamanlamasını sürekli optimize ederek hem motor performansını artırabilir hem de emisyonları azaltabilir.

Alternatif olarak yapılacak sonraki çalışmalarda, elektromekanik sistemlerin yanı sıra piezoelektrik veya elektrohidrolik destekli hibrit aktüatör sistemleri de kullanılabilir. Bu tür sistemler, daha kısa tepki süreleri ve daha yüksek çalışma frekanslarına ulaşarak, özellikle yüksek devirli motorlarda daha etkin bir çözüm sunabilir.

Sonuç olarak, ESM teknolojisi güncel konfigürasyonu ile orta devirli motor uygulamalarında başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak yüksek devirli motor çalışmaları için sistemin yeniden yapılandırılması hem aktüatör tasarımı hem de kontrol stratejileri açısından teknolojik gelişim gerektirmektedir.

4.5. Klasik Supap Mekanizması ve ESM'nin Valf Profili ve Hızı, Silindir İçi Basınçları ve Volümetrik Verim Açısından Karşılaştırması

Bu aşamada, klasik kam mekanizması ve ESM emme valfi profilleri karşılaştırılmıştır. Valf profilleri ve üst ölü nokta (TDC), lazer konum sensörü ve TDC sensörleri kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel testler sonucunda, Şekil 4.15'te gösterildiği gibi, geleneksel kam mekanizmasıyla karşılaştırıldığında ESM'den daha geniş bir emme valfi profili elde edilmiştir (800 dev/dk). Ayrıca, ESM kullanıldığında maksimum valf kaldırma için daha kısa zamana ihtiyaç duyulmuştur. Valf kaldırma profilleri arasındaki bu farklılıklar, emme stroğu sırasında emme manifoldu boyunca hava akış alanında artış sağlamıştır. Bu yaklaşık olarak 800 dev/dk'da 0.291 kg/h daha fazla hava silindir içerisine alınmış ve bu sayede volümetrik verimde yaklaşık olarak %3,5'luk bir artış sağlanmıştır.

Bu sonuçlar, elektromekanik supap sistemlerinin yalnızca zamanlama esnekliği değil, aynı zamanda performans optimizasyonu açısından da geleneksel supap sistemlerine kıyasla üstünlük sağladığını göstermektedir. Özellikle düşük motor hızlarında, ESM sisteminin hızlı tepkisi ve kaldırma profiline müdahale edilebilirliği, yanma odasına giren hava kütlesinin daha etkin kontrolünü mümkün kılmakta ve bu da motorun genel verimliliğini artırmaktadır.

İçten yanmalı motorlarda valf açılma hızı, emme ve egzoz stroğu sırasında silindire alınan hava kütlesi, yanma verimliliği ve motor performansı açısından kritik bir parametredir.

Bu bağlamda, klasik kam mekanizması ve elektromekanik supap sistemi (ESM) kullanılarak elde edilen valf açılma hızları karşılaştırılmıştır.

Klasik kam tahrikli sistemlerde valfin açılma profili, mekanik olarak işlenmiş sabit bir kam profiline bağlıdır. Bu sistemlerde:

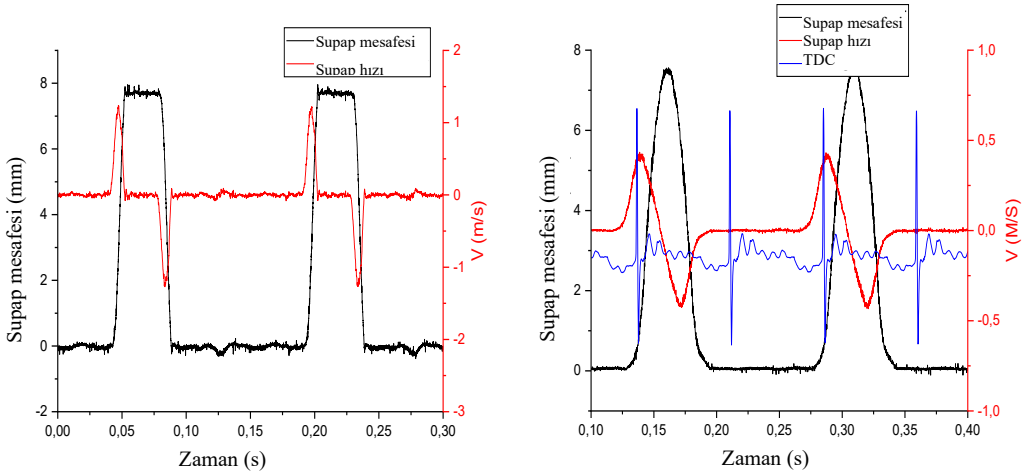
- Valf açılma ve kapanma eğrileri trigonometrik veya parabolik formlar üzerine tasarlanmıştır.
- Maksimum valf açılma hızı genellikle krank açısı başına milimetre (mm/°CA) cinsinden ifade edilir.
- Tipik olarak 800–3000 dev/dk aralığında, valf açılma hızı literatürde yaklaşık 0.05–0.1 mm/°CA düzeyindedir.
- Kam geometrisinin sabit olması nedeniyle, motor devri artsa bile profilin şekli değişmez; bu durum özellikle düşük devirlerde yetersiz valf tepkisi doğurabilir.

Elektromekanik supap sistemlerinde ise;

- Valf hareketi tamamen zaman bazlı elektronik sinyallerle belirlenir.
- Maksimum valf açılma hızı, sürücü akımı, elektromanyetik kuvvet ve yay karakteristiklerine göre ayarlanabilir.
- 800 dev/dk'da tipik valf açılma hızı 0.15–0.25 mm/°CA mertebesine ulaşabilir.
- Açılma süresi daha kısa olduğu için, valf kaldırma eğrisi daha dik ve keskindir.
- Ayrıca, farklı devirlerde valf zamanlaması ve hız profili yazılımsal olarak değiştirilebilir (örneğin düşük devirde hızlı açılma, yüksek devirde gecikmeli kapanma gibi).

Tablo 4.10. ESM ve Klasik Kam Sistemi Karşılaştırılması

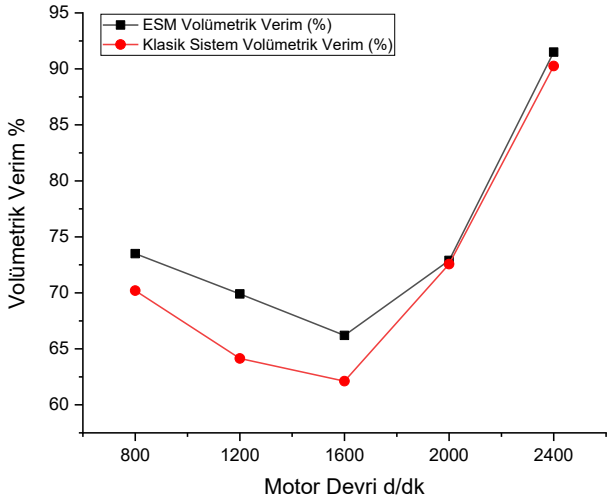
	Klasik Kam Mekanizması	**ESM (Elektromekanik Supap Mekanizması)**
Valf Açılma Hızı (800 dev/dk)	~0.06 mm/°CA	~0.20 mm/°CA
Açılma Süresi	~20–30 °CA	~10–15 °CA
Profil Esnekliği	Sabit	Programlanabilir
Zamanlama Ayarı	Mekanik olarak sabit	Gerçek zamanlı, değişken
Düşük Devir Performansı	Sınırlı	Yüksek



Şekil 4.15. 800 dev/dk'da Valf profili ve hızının karşılaştırılması

Elde edilen deneysel verilere ve literatürdeki karşılaştırmalı çalışmalara göre, ESM sistemleri klasik kam mekanizmalarına kıyasla çok daha hızlı valf açılma özelliklerine sahiptir. ESM ile aynı devirde (800 dev/dk) supap açılma hızı yaklaşık 1,3 m/s olurken bu durum klasik sistemde 0,4 m/s civarındadır. Bu durum, özellikle düşük devirli motor çalışma koşullarında volümetrik verimin artmasına, yanma verimliliğinin yükselmesine ve motorun tepki hızının iyileştirilmesine doğrudan katkı sağlar.

ESM'nin sunduğu yüksek açılma hızı ve programlanabilir profil avantajı, motor kontrol algoritmalarının gelişmiş yanma stratejileri (örneğin Atkinson, Miller, HCCI gibi) ile entegre edilmesine olanak tanır. Bu bağlamda, valf açılma hızı performans kriteri açısından ESM sistemleri, klasik kam mekanizmalarına göre üstünlük sağlamaktadır.



Şekil 4.16. Klasik Sistem ve ESM Volümetrik verim Grafiği

Şekil 4.16 ve Tablo 4.11'da görüldüğü üzere ESM ile yapılan deneysel çalışmalarda 800-2400 dev/dk motor çalışma şartlarında volümetriktik verimin klasik sisteme göre artış göstermiştir. 800 dev/dk ESM sisteminde volümetrik verim %73,5 iken klasik sistemde %70,2'dir. Düşük devirde ESM'nin daha hızlı valf açılma/kapanma avantajı sayesinde hava dolumu artmış, bu da yaklaşık %3,3'lük bir iyileşme sağlamıştır. 1200 dev/dk ve 1600 dev/dk orta devir aralıklarında klasik sistemin valf zamanlaması sınırlamaları nedeniyle verim daha düşük kalmıştır (%64,14 ve %62,12). ESM sistemi ise bu devirlerde yaklaşık %5-6 oranında daha yüksek verim sağlamış ve hava akış yönetiminde üstünlük göstermiştir. 2000 dev/dk'da her iki sistem de benzer performans sergilemiş olup (%72,9 vs. %72,57)

2400 dev/dk'da ise ESM sistemi %91,5 verim ile klasik sisteme (%90,26) kıyasla daha üstün bir performans göstermektedir. ESM sisteminin özellikle düşük ve orta motor devirlerinde klasik kam sistemine kıyasla daha yüksek volümetrik verim sağladığı açıkça gözlemlenmektedir. Bu sonuç, ESM'nin programlanabilir supap zamanlaması ve açılma profili sayesinde değişken motor koşullarına daha iyi uyum sağladığını kanıtlamaktadır. Ayrıca, yüksek devirde bile klasik sistemi en azından eşitleyebilmesi, sistemin tüm devir bandında optimum hava-yakıt yönetimi sunduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda ESM hem volümetrik verim artışı hem de yanma kalitesinin iyileştirilmesi açısından klasik sistemlere göre önemli avantajlar sunmaktadır.

Tablo 4.11. Volümetrik Verim Karşılaştırılması

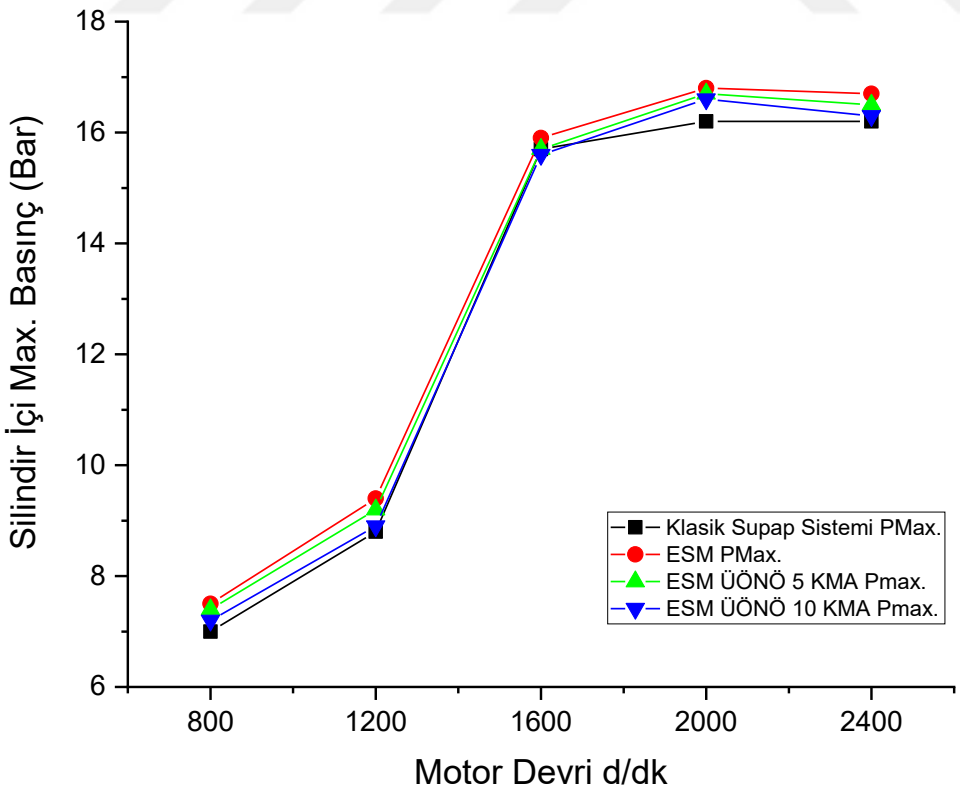
Motor Deviri (dev/dk)	ESM Volümetrik Verim (%)	Klasik Sistem Volümetrik Verim (%)
800	73.5	70.2
1200	69.9	64.14
1600	66.2	62.12
2000	72.9	72.57
2400	91.5	90.26

Elektromekanik supap sistemlerinin klasik kam mekanizmalarına kıyasla sunduğu profil esnekliği ve zamanlama kontrolü, birçok akademik çalışmada detaylı biçimde analiz edilmiştir. Özellikle valf açıklık profili şeklinin, supap açık kalma süresi ve maksimum kaldırma yüksekliği ile değerlendirilmesinin, silindir dolumu ve yanma karakteristikleri üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır.

Stokes ve Senior, (2013) ise, klasik kam profillerinin genellikle daha uzun açık kalma sürelerine sahip olduğunu, ancak maksimum kaldırma noktasına daha yavaş ulaştığını ortaya koymuştur. Bu durumun, motorun düşük devirde yüksek dolum etkinliği sağlamasına yardımcı olduğu; fakat yüksek devirlerde supap gecikmesi problemi oluşturabileceği ifade edilmiştir. Buna karşılık ESM sistemlerinin hızlı hareket kabiliyeti sayesinde bu tür gecikmeleri minimize edebildiği ve optimum emme zamanlamasıyla çalışabildiği aktarılmıştır.

Tüm bu çalışmalar, ESM sistemlerinin sabit geometrili klasik kam sistemlerine göre çok daha uyarlanabilir ve optimize edilebilir valf profilleri sunabildiğini ortaya koymaktadır. Bu esneklik hem düşük hem de yüksek motor devirlerinde, motor performansının ve veriminin artırılmasına olanak sağlamaktadır. Ancak bu sistemlerin başarısı, yalnızca donanımsal değil; aynı zamanda gerçek zamanlı çalışan ileri kontrol algoritmalarıyla desteklenmesiyle doğrudan ilişkilidir.

Silindir içi maksimum basınçlar karşılaştırıldığında ESM ile sislindir içi basınçlarının daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu sonuçlar Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17.Silindir İçi Maksimum Basınç Grafiği

Düşük devirde ESM'nin standart zamanlaması klasik sisteme göre yaklaşık %7,1 daha yüksek basınç üretmiştir. Ancak açılış zamanı erkene alındığında (+10°), erken supap açılması nedeniyle silindir içine alınan hava miktarı azalmış, bu da basınç kaybına neden olmuştur. Orta düşük devirde de (1200-1600 dev/dk) ESM tüm deney şartlarında klasik sistemden daha yüksek basınç üretmiştir. En iyi sonuç ESM'nin standart zamanlamasında elde edilmiştir.

Yüksek devirlerde ise ESM klasik sisteme göre avantajını korumaktadır. Ancak ÜÖNÖ +10° zamanlaması neredeyse klasik sistem ile aynı basınca değerine sahiptir. Bu, çok erken valf açılmasının taze karışımın geri kaçışına neden olabileceğini düşündürmektedir.

Elektromekanik supap sisteminin sunduğu zamanlama esnekliği, özellikle 800–2000 dev/dk aralığında silindir içi maksimum basınçların klasik sisteme kıyasla daha yüksek olmasını sağlamıştır. Ancak emme valfi açılış zamanının aşırı erkene alınması, düşük devirlerde silindir dolumunun zayıflamasına ve dolayısıyla basınç kaybına neden olmuştur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının temel amacı, tek silindirli içten yanmalı bir motor için elektromekanik supap sistemine yönelik özgün bir tasarım gerçekleştirmek, bu tasarımı fiziksel olarak prototip düzeyinde üretmek ve elde edilen sistemin performansını, geleneksel kam tahrikli mekanik supap sistemleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir.

Çalışma kapsamında, ESM sisteminin sunduğu programlanabilir supap zamanlaması avantajların, motorun farklı çalışma koşullarındaki etkileri tüm motor çalışma devirlerinde analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, geliştirilen ESM sisteminin, motor devri, supap hareket profili, supap açılma-kapanma hızları, volümetrik verimlilik ve silindir içi basınç davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Karşılaştırmalı analizler hem deneysel veriler hem de sayısal modelleme sonuçları temelinde yürütülmüştür. Elde edilen performans ölçütleri, motorun 800 ila 2400 devir/dakika aralığındaki farklı çalışma senaryolarında değerlendirilmiş, klasik sistem ile ESM arasındaki farklar detaylı şekilde ortaya konmuştur.

Ayrıca, bu tez çalışması, mevcut literatürde ağırlıklı olarak simülasyon ve kontrol algoritması düzeyinde ele alınan elektromekanik supap sistemlerine ilişkin eksik olan deneysel veriye dayalı performans değerlendirmesi ihtiyacını karşılamayı da hedeflemektedir. Bu çalışma kapsamında, klasik kamlı supap mekanizması ile elektromekanik supap mekanizması (ESM) kullanılarak yürütülen deneysel testlerin sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve her iki sistemden elde edilen verilerin genel anlamda birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir. ESM'nin uygulanmasıyla birlikte, özellikle volümetrik verimde kayda değer iyileşmeler gözlemlenmiş, supapların açılma ve kapanma zamanlarının hassas şekilde kontrol edilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu bağlamda, ESM ile elde edilen supap hareket profilleri ile klasik kam sistemine ait profiller karşılaştırılmış ve sistem performansındaki farklar ortaya konulmuştur.

Modelleme çalışmalarında, deneysel veriler ile sayısal analiz sonuçları arasında tutarlılık sağlanmış; elde edilen bulgular literatürde sunulan simülasyon ve modelleme çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Mevcut literatürde, ESM üzerine yapılan çalışmaların büyük ölçüde kontrol algoritmaları, sistem modellemesi ve simülasyon

tabanlı yaklaşımlarla sınırlı olduğu; buna karşılık içten yanmalı motorlarda ESM'nin volümetrik verim üzerindeki doğrudan etkisine yönelik deneysel veriye dayalı araştırmaların eksik olduğu tespit edilmiştir. Bu yönüyle, yürütülen bu proje çalışması, alandaki önemli bir boşluğu deneysel veriler ışığında doldurmayı amaçlamaktadır.

Elde edilen deneysel bulgular doğrultusunda, ESM'nin uygulanmasıyla klasik sisteme kıyasla daha geniş bir supap açıklık profili elde edilmiş; bunun sonucunda, silindir içerisine alınan hava kütlesinde artış sağlanmıştır. Bu gelişme, motorun volümetrik veriminde %3,5 ila %5,8 arasında değişen oranlarda artışa neden olmuş ve ESM kullanımının motor performansına olan olumlu etkisini somut biçimde ortaya koymuştur.

ESM sisteminde, emme supabı açılma zamanlarının Üst Ölü Nokta'dan (ÜÖN) sırasıyla 5 ve 10 Krank Mili Açısı (KMA) önceye alınarak gerçekleştirilen testlerde, motorun orijinal zamanlamasına kıyasla silindir içerisine alınan hava kütlesinde kısmi azalmalar gözlemlenmiştir. Ancak bu azalmaya rağmen, klasik kam mekanizmasıyla elde edilen değerlere kıyasla volümetrik verimde belirgin bir artış tespit edilmiştir. Bu durum, ESM'nin sağladığı esnek supap zamanlaması sayesinde silindirin daha etkin bir biçimde doldurulmasına imkân tanıdığı şeklinde yorumlanabilir.

Buna ek olarak, emme supabının kapanma zamanının Alt Ölü Nokta sonrası (AÖNS) 25 KMA'ya ayarlanması durumunda, klasik zamanlama olan AÖNS 40 KMA'ya kıyasla volümetrik verimde yaklaşık %1'lik bir artış sağlandığı ve bu zamanlamayla silindir içi basıncın da yükseldiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, erken kapanan emme supabının dinamik etkiler altında daha verimli bir dolum süreci oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Deneysel çalışmalar sonucunda, motor devrinin yaklaşık 2000 dev/dk'nın üzerine çıkmasıyla birlikte, ESM sistemiyle oluşturulan emme supabı profillerinin klasik supap profiline yaklaştığı ve bu nedenle volümetrik verimde anlamlı bir değişimin gözlenmediği belirlenmiştir. Bu durum, yüksek devirlerde supabın yeterli hızda açılıp kapanamamasıyla ilişkilidir. Bu sınırlama, bobin içerisindeki elektromanyetik kuvvetin artırılmasıyla aşılabilir. Elektromanyetik kuvvetin yükseltilmesi ise ya bobin sarım sayısının artırılmasıyla ya da uygulanan akımın yükseltilmesiyle mümkün olmaktadır. Ancak akımın artırılması, bobin sıcaklığında artışa neden olacağı için ek bir soğutma

sistemine ihtiyaç duyulacaktır. Bu noktada en uygun çözümün, bobin boyutlarının büyütülmesi olduğu değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, ESM sisteminin uygulanması ile motorun volümetrik veriminde kayda değer artışlar elde edilmiştir. ESM'nin sunduğu değişken supap zamanlaması ve supap açıklık seviyesi kontrolü sayesinde, özellikle dolaylı enjeksiyonlu motorlarda karışım kalitesinin iyileştirilmesi, doğrudan enjeksiyonlu motorlarda ise supap bindirmesinin etkin biçimde ayarlanması gibi avantajlar sunulmaktadır. Bu özellikler, yanma sürecinin daha etkin kontrol edilmesine olanak tanıyarak hem performans hem de emisyonlar açısından potansiyel iyileştirmelere zemin hazırlamaktadır.

KAYNAKLAR

Alex, G., Ilya, K. (2003). Modelling Positive Intake Valve Overlap Air Charge Response in Camless Engines. *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, USA, 4–6 Haziran, ss. 755–760.

Aliyu, B., Musa, J. I. (2016). Modelling, Simulation & Analysis of Electro Magnetic Valve Actuator (EMVA) for Automotive System. *Advances in Research*, **7**(4), 1–14.

Aslam, J., Li, X.-h., Janjua, F. K. (2017). Design Of A Hybrid Magnetomotive Force Electromechanical Valve Actuator. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18, 1635-1643. DOI: 10.1631/FITEE.1601215.

Asmus, T. (1982). Valve Events and Engine Operation. *SAE Technical Paper* No. 820749.

Butzman, S., Melbert, J., Kock, A. (2000). Sensorless Control of Electromagnetic Actuators for Variable Valve Train. *SAE Technical Paper* No. 2000-01-1225.

Schernus, C., Van der Staay, F., Janssen, H., Neumeister, J., Vogt, B., Donce, L., Estlimbaum, I., Nicole, E., Maerky, C. (2003). Modeling of Exhaust Valve Opening in a Camless Engine. *SAE Technical Paper* No. 2002-01-0376.

Chang, S., Parlikar, T. A., Seeman, M. D., Perreault, D. J., Kassakian, J. G., Keim, T. A. (2002). A New Electromagnetic Valve Actuator. *IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation*, ss. 109–118.

Dresner, T., Barkan, P. (1989). A Review and Classification of Variable Valve Timing Mechanisms. *SAE Technical Paper* No. 890674.

Giglio, V., Iorio, B., Police, G., Gaeta, A. (2002). Analysis of Advantages and Problems of Electromechanical Valve Actuators. *SAE Technical Paper* No. 2002-01-1105.

Gould, L., Richeson, W., Erickson, F. (1991). Performance Evaluation of a Camless Engine Using Valve Actuation with Programmable Timing. *SAE Technical Paper* No. 910450.

Gray, C. A. (1988). Review of Variable Engine Valve Timing. *SAE Technical Paper* No. 880386.

Ham, Y. Y., Park, P. (1991). The Effects of Intake Valve Events on Engine Breathing Capability. *Proceedings of the Sixth International Pacific Conference on Automotive Engineering*, Seoul, Korea, 11 Ocak, ss. 10–12. SAE Technical Paper No. 912470.

Hara, S., Kumagai, K., Matsumoto, V. (1989). Application of a Valve Lift and Timing Control System to an Automotive Engine. *SAE Technical Paper* No. 890681.

Heywood, J. B. (1998). Internal Combustion Engine Fundamentals (2nd. ed.). New York: *McGraw-Hill*

Hoffmann, W., Stefanopoulou, A. (2001a). Valve Position Tracking for Soft Land of Electromechanical Valvetrain. *Proceedings of the 3rd IFAC Conference on Advances in Automotive Control*, ss. 305–310.

Hoffmann, W., Peterson, K., Stefanopoulou, A. (2001b). Iterative Learning Control for Soft Landing of Electromechanical Valve Actuator in Camless Engines. *Proceedings of the American Control Conference*, ss. 2860–2866.

Hoffmann, W., Stefanopoulou, A. (2003). Iterative Learning Control of Electromechanical Camless Valve Actuator. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 11(2), 174–184.

Kamış, Z., Yüksel, İ. (2004). Elektromekanik Supap Mekanizmalarında Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *9* (2), 45–58.

Krauter, P., Heuser, P., Schebitz, M. (1992). Strategies to Improve SI-Engine Performance by Means of Variable Intake Lift, Timing and Duration. *SAE Technical Paper* No. 920449.

Liu, L., Chang, S. (2015). Power Consumption Of Electromagnetic Valvetrain System. *WSEAS Transactions On Applied And Theoretical Mechanics*, 10, 179-188. E-ISSN: 2224-3429.

Liu, J.-J., Yang, Y.-P., Xu, J.-H. (2008). Electromechanical Valve Actuator With Hybrid MMF For Camless Engine. *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, *41*(2), 10698-10703. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01813

Mercorelli, P. (2017). A Motion-Sensorless Control for Intake Valves in Combustion Engines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(4), 2875–2886.

Mahrous, F. M., ve diğ. (2007). Computational Fluid Dynamics Simulation of In-Cylinder Flows in a Motored Homogeneous Charge Engine Cylinder with Variable Negative Valve Overlapping. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*.

Müller, M., Schreiber, M., Koch, T. (2021). Benefits and Limitations of Fully Variable Valve Actuation in Gasoline Engines: Experimental and Simulation-Based Investigation. *SAE Technical Paper*, 2021-01-0408.

Nitu, C., Gramescu, B., Nitu, S. (2005). Application of Electromagnetic Actuators to a Variable Distribution System for Automobile Engines. *Journal of Materials Processing Technology*, 161, 253–257.

Nakada, H., Nakamura, Y. (2015). Development of Electromagnetic Valve Train for High-Efficiency Engines. *SAE Technical Paper*, 2015-01-0770.

Park, S. H., Lee, J., Yoo, J., Kim, D. (2003a). A Study on the Design of Electromagnetic Valve Actuator for VVT Engine. *KSME International Journal*, 17, 357–369.

Park, S. H., Lee, J., Yoo, J., Kim, D., Park, K. (2003b). Effects of Design and Operating Parameters on the Static and Dynamic Performance of an Electromagnetic Valve Actuator. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 217, 193–201.

Park, S. H., Lee, J., Yoo, J., Kim, D., Park, K., Cho, Y. (2001). A Developing Process of Newly Developed Electromagnetic Valve Actuator: Effect of Design and Operating Parameters. *SAE Technical Paper* No. 02FFL-93.

Peterson, K. S., Stefanopoulou, A. G. (2004). Extremum Seeking Control for Soft Landing of an Electromechanical Valve Actuator. *Automatica*, 40, 1063–1070.

Peterson, K., Stefanopoulou, A., Megli, T., Haghgooie, M. (2002b). Output Observer Based Feedback for Soft Landing of Electromechanical Camless Valvetrain Actuator. *Proceedings of the American Control Conference*, ss. 1413–1418.

Peterson, K., Stefanopoulou, A., Wang, Y. (2002a). Control of Electromechanical Actuators: Valves Tapping in Rhythm. *Mohammed Dahleh Symposium, University of California*, Santa Barbara, 10-12 April 2002.

Peterson, K., Stefanopoulou, A., Wang, Y., Haghgooie, M. (2002c). Nonlinear Self-Tuning Control for Soft Landing of an Electromechanical Valve Actuator. *IFAC Mechatronics Conference*.

Pischinger, M., Salber, W., Van der Staay, F., Baumgarten, H., Kemper, H. (2000). Benefits of the Electromechanical Valve Train in Vehicle Operation. *Variable Valve Actuation. SAE Technical Paper* No. 2000-01-1223, ss. 43–53.

Safgönül, B., Soruşbay, E., Arslan, M., Ergeneman, M. (1999). İçten Yanmalı Motorlar. İstanbul: Birsen Yayınevi.

Samani, R., Khodadadi, H. (2017). A Particle Swarm Optimization Approach For Sliding Mode Control Of Electromechanical Valve Actuator In Camless Internal Combustion Engines. *Proceedings of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering & 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Milan, Italy, 6-9 June.

Schernus, C. (2002). Modeling of Exhaust Valve Opening in a Camless Engine. *SAE Technical Paper*, 2002.

Seethaler, R. (2013). Closed Loop Electromagnetic Valve Actuation Motion Control on a Single Cylinder Engine. *SAE Technical Paper* No. 2013-01-0594.

Stivender, D. L. (1968). Intake Valve Throttling (IVT) – A Sonic Throttling Intake Valve Engine. *SAE Technical Paper* No. 680399.

Stone, R. (1985). Introduction to Internal Combustion Engine. (2nd. ed.) New York: McMillan Publishing.

Stokes, J., Senior, M. (2013). Variable Valve Timing: A Review of Technologies and Their Impact on Fuel Economy and Emissions. *Energy Conversion and Management*, 67, 343–351.

Tai, C., Tsao, T. C. (2002). Control of an Electromechanical Camless Valve Actuator. *Proceedings of the American Control Conference*.

Taylor, C. F. (1997). The Internal Combustion Engine in Theory and Practice (Cilt 2). *MIT Press*, Cambridge, MA.

Theobald, M. A., Lequesne, B., Henry, R. (1994). Control of Engine Load via Electromagnetic Valve Actuators. *SAE Technical Paper* No. 940816.

Trevett, N. R. (2005). X-By-Wire: New Technologies for 42 V Bus Automobile of the Future.

Tuttle, H. J. (1980). Controlling Engine Load by Means of Late Intake Valve Closing. *SAE Technical Paper* No. 800794.

Wang, Y., Stefanopoulou, A., Haghgooie, M., Kolmanovsky, I., Hammoud, M. (2000). Modeling of an Electromechanical Valve Actuator for a Camless Engine. *Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, ss. 93–100.

Xu, J., Chang, S., Fan, X., Fan, A. (2016). Effects Of Electromagnetic Intake Valve Train On Gasoline Engine Intake Charging. *Applied Thermal Engineering*, 96, 708-715.

Yang, X., Liang, K. (2021). Measurement And Modelling Of A Linear Electromagnetic Actuator Driven Camless Valve Train For Spark Ignition IC Engines Under Full Load Condition. *Mechatronics*, 77,102604.

Zhao, H., Ladommatos, N., Ma, T., Shayler, P. J. (2019). Variable Valve Actuation for Efficient Combustion and Emission Control in Internal Combustion Engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(4), 925–940.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Ayaz, M., **Aygül, V**., Düzenli, F., Taşdemirci, E. (2019). Comparative Study on Control Methods for Air Conditioning of Industrial Paint Booths. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 11(11), 1053–1059.

Ayaz, M., Tasdemirci, E., Yuksel, H., **Aygül, V**. (2018). Comprehensive Study on Automation of Toxic Gas Measurement. *Arabian Journal of Geosciences*, *11*(22), 12517-018.

Ayaz, M., Taşdemirci, E., Yüksel, H., **Aygül, V**. (2017). Comprehensive Study on Automation of Toxic Gas Measurement. *International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2017)*, s. 461, Antalya, Turkey.

Aygül, V., Ayaz, M., Özsezen, A. N. (2019). Modelling and Analysis of Spring Return Electromagnetic Valve Actuator for SI Engine. *International Journal of Vehicle Design*, 81, 1–18.

Aygül, V., Ayaz, M., Özsezen, A. N. (2018). Modeling of an Electromagnetic Valve Actuator for Gasoline Engines Based on FEM Analysis. *4th International Congress on Mathematics, Engineering, Natural and Health Sciences (EJONS 2018)*, ss. 227–234, Kiev, Ukraine.

Aygül, V., Ayaz, M., Özsezen, A. N. (2017). Design and Implementation of an Electromagnetic Valve Actuator for IC Engines. *2nd International Conference on Computer Science, Engineering and Applied Science (ICCSEAS 2017)*, Paris, France.

Aygül, V., Özsezen, A. N. (2012). İçten Yanmalı Motorlarda Supap Kontrol Mekanizmaları. *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED)*, 4(3), 15–22.

Aygül, V., Özsezen, A. N., Alptekin, E., Türkcan, A., Çanakcı, M. (2018). The Effect of Electromechanical Valve System on the Volumetric Efficiency of a Single Cylinder Gasoline Engine. *6th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2018)*, ss. 344–350, İstanbul, Turkey.

Aygül, V., Özsezen, A. N., Türkcan, A. (2014). Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Bir İçten Yanmalı Motorda Elektromekanik Supap Mekanizması ile Emme Supabı Açılma Zamanının Denetlenmesi. *Ulusal Otomatik Kontrol Konferansı (TOK 2014)*, ss. 350–354, Turkey.

Demir, U., **Aygül, V**., Coşkun, G., Soyhan, H. S., Türkcan, A., Alptekin, E., Çanakcı, M. (2017). Modelling of the Effect of Electromechanic Valve Mechanism on Air Flow Parameters in a Spark Ignition Engine. *International Advanced Technologies Symposium*, s. 3452, Elazığ, Turkey.

Demir, U., **Aygül, V**., Coşkun, G., Soyhan, H. S., Türkcan, A., Alptekin, E., Çanakcı, M. (2017). Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Bir Motor İçin Hava Akış Parametrelerinin İncelenmesi. *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2017)*, ss. 1520–1529, Baku, Azerbaijan.

Demir, Ü., **Aygül, V**., Coşkun, G., Soyhan, H. S., Türkcan, A., Alptekin, E., Çanakcı, M. (2017). Modelling of the Effect of Electromechanic Valve Mechanism on Air Flow Parameters in a Spark Ignition Engine. *8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17)*, ss. 3543–3552, Elazığ, Turkey.

Demir, Ü., Coşkun, G., Soyhan, H. S., **Aygül, V**., Türkcan, A., Alptekin, E., Çanakcı, M. (2020). Buji Ateşlemeli Tek Silindirli Motorda Elektromekanik Supap Mekanizmasının Kullanılmasının Hava Akış Parametrelerine Etkisinin HAD Yöntemi ile İncelenmesi. *Mühendislikte Yakıtlar, Yangın ve Yanma Dergisi*, 8, 20–27.

Temel, A., Ayaz, M., **Aygül, V**. (2023). Digital Transformation for Improved Energy and Product Efficiency in Tire Production: A Case Study. *Engineering Research Express*, 5(4), 1–15.

Yıldırım, H., Çınar, A., Özsezen, A. N., **Aygül, V**. (2017). Examining of the Relationship Between Cylinder Pressure and Block Vibration in a Diesel Engine with Fuelled Alternative Fuels. *8th International Advanced Technologies Symposium*, ss. 3310–3317, Elazığ, Turkey.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2006 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. 2011-2014 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2012 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.