

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TEK SİLİNDİRLİ, 4 ZAMANLI KIVILCIM ATEŞLEMELİ BİR
MOTORDA ELEKTROMEKANİK KONTROLLÜ SUPAP
MEKANİZMASI TASARIMI VE SİMÜLASYONU**

Asım AYDIN

Danışman: Prof. Dr. Murat ÇETİN

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN
2022
Her Hakkı Saklıdır.**

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TEK SİLİNDİRLİ, 4 ZAMANLI KIVILCIM ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA ELEKTROMEKANİK KONTROLLÜ SUPAP MEKANİZMASI TASARIMI VE SİMÜLASYONU

Asım AYDIN

Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat ÇETİN

İçten yanmalı motorlarda kullanılan supap mekanizmaları; motor performansı, yakıt tüketimi ve egzoz emisyon değerleri gibi birçok parametreyi doğrudan etkilemektedir. Günümüzde içten yanmalı motorlarda iyileştirme amaçlı olarak supap sistemleri üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır. Supaplar, kam miline bağımlı ve kam milinden bağımsız şekilde çalışabilmektedir. Kam miline bağımlı supap sistemleri, kam milinden kaynaklanan kısıtlamalar sebebiyle tamamen esnek bir şekilde çalışamazlar. Bu tez çalışmasında, yaygın olarak kullanılan kam miline bağımlı supap mekanizmalarındaki kam sistemi olmaksızın, sistemin daha esnek çalışmasını sağlamak amacıyla KAMA KG 390 motoru referans alınarak elektromekanik kontrollü supap mekanizmasının tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. Sistemin, supapları yaklaşık 5,5-6 mm açıp-kapatması için oluşturulan matematiksel model, MATLAB/Simulink programında simülasyonu gerçekleştirilerek; gerilim, akım, supabın konumu, manyetik kuvvet ve silindir içindeki basınç kuvveti gibi parametreler incelenmiştir.

2022, 57 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Elektromekanik kontrollü supap, İçten yanmalı motor, Kam mili, Supap sistemleri

ABSTRACT

Master Thesis

ELECTROMECHANICAL CONTROLLED VALVE MECHANISM DESIGN AND SIMULATION IN A SINGLE CYLINDER, 4-STROKE SPARK- IGNITION ENGINE

Asım AYDIN

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat ÇETİN

Valve mechanisms used in internal combustion engines directly affect many parameters such as engine performance, fuel consumption and exhaust emission values. Today, many studies are carried out on valve systems for improvement purposes in internal combustion engines. The valves can operate independently of and dependent on the camshaft. Camshaft dependent valve systems cannot operate completely flexibly due to camshaft constraints. In this thesis, the design and simulation of the electromechanically controlled valve mechanism has been made with reference to the KAMA KG 390 engine in order to provide more flexible operation of the system without the cam system in the commonly used camshaft dependent valve mechanisms. The mathematical model created for the system to open and close the valves approximately 5.5-6 mm, by performing the simulation in the MATLAB/Simulink program; Parameters such as voltage, current, valve position, magnetic force and pressure force in the cylinder have been investigated.

2022, 57 Pages

Keywords: Camshaft, Electromechanically controlled valve, Internal combustion engines, Valve systems

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, tecrübe, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Murat ÇETİN'e sonsuz teőekkürlerimi sunuyorum.

Tez alıőması süresi boyunca yardımlarını esirgemeyen Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakóltesi Öğretim Üyeleri; Prof. Dr. Ahmet TANDIROęLU'na, Dr. Öğretim Üyesi Kamil ORMAN'a, Doç. Dr. Mehmet Cihat ÖZGENEL'e, Yalova Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Fikret YÜKSEL'e ve hayatım boyunca bana destek olan değerli aileme çok teşekkür ediyorum.

Asım AYDIN

Temmuz, 2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	9
3.1. İçten Yanmalı Motorlar	9
3.2. İçten Yanmalı Motorlarda Zaman	9
3.3. İçten Yanmalı Motorlarda Supaplar	12
3.4. İçten Yanmalı Motorlarda Supap Zamanlaması	16
3.4.1. Supap zamanlamasının volumetrik verime etkisi.....	18
3.4.2. Supap zamanlamasının özgül yakıt tüketimine etkisi.....	19
3.5. İçten Yanmalı Motorlarda Supap Mekanizmaları	19
3.5.1. Supap açıklık süresi	20
3.5.2. Supap açılma miktarı	21
3.6. Değişken Supap Zamanlaması ve Sınıflandırılması.....	21
3.6.1. Kam miline bağımlı değişken supap sistemleri.....	22
3.6.1.1. Kam fazını kaydıran sistemler	23
3.6.1.2. Supap yüksekliğini değiştiren sistemler.....	25
3.6.1.3. Kam fazını kaydıran ve supap yüksekliğini değiştiren sistemler	27
3.7. Kam Milinden Bağımsız Değişken Supap Sistemleri	29
3.7.1. Elektromekanik supap sistemleri.....	30
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
4.1. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Tasarımı ve Hesaplamaları.....	31
4.2. Elektromekanik Supap Mekanizmalarında Solenoid Bobin ve Manyetik Alan	36

4.2.1. Solenoid bobinin lineer hareketi ve boyutlandırılması	40
4.3. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Matematik Modeli	42
4.3.1. Elektrik alt sistemi	43
4.3.2. Manyetik alt sistemi.....	45
4.3.3. Mekanik alt sistemi.....	45
4.4. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Simulink Modeli	46
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	47
5.1. Giriş	47
5.2. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Simülasyon Sonuçları	47
5.3. Elektromekanik Supap Mekanizmasında Akım ile Gerilim İlişkisi.....	51
5.4. Elektromekanik Supap Mekanizmasında Manyetik Kuvvet ile Mesafe İlişkisi	51
5.5. Elektromekanik Supap Mekanizmasında Akım ile Manyetik Kuvvet İlişkisi....	52
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	53
6.1. Sonuç	53
6.2. Öneriler	54
KAYNAKLAR.....	55

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. İki zamanlı benzinli motorun çalışma prensibi	10
Şekil 3.2. Dört zamanlı benzinli motorun çalışma prensibi	11
Şekil 3.3. L tipi supap sistemi	14
Şekil 3.4. T tipi supap sistemi	14
Şekil 3.5. F tipi supap sistemi.....	15
Şekil 3.6. I tipi supap sistemi	16
Şekil 3.7. Supap zaman ayar diyagramı	16
Şekil 3.8. Teorik ve pratik Otto çevrimi	17
Şekil 3.9. Emme-egzoz zamanları ve supap bindirmesi	18
Şekil 3.10. Supap açıklık süresi.....	20
Şekil 3.11. Supap açılma miktarı.....	21
Şekil 3.12. Pistonlu pompa.....	22
Şekil 3.13. DOHC supap sistemi	23
Şekil 3.14. Emme fazının kaydırıldığı sistemler	24
Şekil 3.15. BMW Double Vanos sistemi	24
Şekil 3.16. Farklı kam profilinin emme supabına uygulanması	25
Şekil 3.17. Porsche VarioCam Plus sistemi	26
Şekil 3.18. Honda VTEC sistemi.....	27
Şekil 3.19. Kam fazının kaydırılması ve farklı supap açılma miktarı	28
Şekil 3.20. Toyota Valvematic sistemi	29
Şekil 4.1. Elektromekanik kontrollü supap mekanizması.....	31
Şekil 4.2. Krank mili açısına göre supap açılma miktarı	32
Şekil 4.3. Silindir içi basınç değişimi	33
Şekil 4.4. Ferromanyetik malzemenin B-H grafiği	37
Şekil 4.5. Solenoid bobinde manyetik alan ve çizgileri.....	39
Şekil 4.6. Solenoid bobin nüvesi lineer hareketi	40
Şekil 4.7. Solenoid bobin kesiti	41
Şekil 4.8. Makara.....	42
Şekil 4.9. Elektromekanik supap sistemi blok diyagramı	43
Şekil 4.10. Elektrik alt sistemi.....	43

Şekil 4.11. Manyetik devre	45
Şekil 4.12. Elektromekanik supap mekanizmasının MATLAB/Simulink modeli	46
Şekil 5.1. Elektromekanik supap mekanizmasında gerilimin zamana bağlı değişimi....	47
Şekil 5.2. Elektromekanik supap mekanizmasının akım davranışı	48
Şekil 5.3. Elektromekanik supap mekanizmasında supabın açılma mesafesi.....	49
Şekil 5.4. Elektromekanik supap mekanizmasında supaba etkiyen manyetik kuvvet....	50
Şekil 5.5. Elektromekanik supap mekanizmasında supaba etkiyen basınç kuvveti	50
Şekil 5.6. Elektromekanik supap mekanizmasında akım-gerilim ilişkisi	51
Şekil 5.7. Elektromekanik supap mekanizmasında manyetik kuvvet-mesafe ilişkisi	52
Şekil 5.8. Elektromekanik supap mekanizmasında akım-manyetik kuvvet ilişkisi	52



TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. KAMA KG 390 motorunun özellikleri	32
Tablo 4.2. Elektromekanik supap sisteminin kütlesi	35
Tablo 4.3. Krank açlarına göre maksimum supap hareket zamanı ve kütle miktarı	35
Tablo 4.4. Solenoid bobinin boyutları	41
Tablo 4.5. Solenoid bobinin özellikleri.....	42



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Bobinin kesit alanı (m^2)
A_s	Supap tablası kesit alanı (m^2)
B	Manyetik akı yoğunluğu (Wb/m^2)
b	Sönüm katsayısı ($N/(m/s)$)
d_t	Bobinin tel çapı (m)
e_e	Devrenin toplam gerilimi (V)
e_L	Endüktans elemanındaki gerilim (V)
e_R	Bobinin direnç gerilimi (V)
f_l	Boşluk faktörü (-)
F_b	Basınç kuvveti (N)
F_m	Manyetik kuvvet (N)
F_{mmf}	Manyetomotor kuvveti (AN)
F_{yay}	Yay kuvveti (N)
H	Manyetik alan şiddeti (A/m)
H_c	Koersif kuvvet (A/m)
i	Akım (A)
k	Yay sabiti (N/mm)
L	Endüktans (H)
l	Bobin uzunluğu (m)
m	Kütle (kg)
m_c	Bobinin cidar kalınlığı (m)
n	Motor devri (dev/dk)
r_0, r_1, r_2, r_3	Solenoid bobin boyutları (m)
r_4, r_5, r_6	Solenoid bobin boyutları (m)
R	Bobin direnci (Ω)
R_m	Manyetik direnç (H)
T	Periyot (s)
t_c	Supap hareket zamanı (s)

v	Hız (m/s)
w_n	Doğal frekans (rad/s)
W_m	Manyetik alanda depolanan enerji (J)
x	Nüvenin bobin içerisinde aldığı mesafe (m)
x_h	Nüvenin hareket mesafesi (m)
x_0	Nüvenin ilk baştaki konumu (m)
z	Hava aralığı sayısı (-)
θ_c	Krank mili açısı ($^\circ$)
μ_r	Bağıl geçirgenlik (-)
μ_0	Havanın manyetik geçirgenliği (H/m)
Φ	Bir sarımdan geçen manyetik akı (Wb/N)
Ψ	Bobinin toplam manyetik akısı (Wb)
λ	Manyetik akı bağı (Wb)

Kısaltmalar

AÖN	Alt Ölü Nokta
CVCP	Sürekli değişen kam fazı (Continuously Variable Cam Phaser)
DOHC	Silindir kapağı üzerinde iki kam mili (Double Overhead Camshaft)
ECU	Elektronik Kontrol Ünitesi (Electronic Control Unit)
EMK	Elektromotor Kuvveti
EMS	Elektromekanik Supap
HCCI	Homojen sarjlı sıkıştırılmalı ateşleme (Homogeneous Charge Compression Ignition)
KMA	Krank Mili Açısı
MICE	Modelling Internal Combustion Engines
OHC	Silindir kapağı üzerinde tek kam mili (Overhead Camshaft)
OHV	Üstten supaplı (Overhead Valve)
SPCCI	Kıvılcım kontrollü sıkıştırılmalı ateşleme (Spark Plug Controlled Compression Ignition)
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
VANOS	Değişken kam mili zamanlaması (Variable Nockenwellen Steuerung)

VTEC	Değişken zamanlı supap zamanlaması ve açılma kontrolü (Variable Valve Timing and Lift Electronic Control)
VVL	Değişken supap kaldırma (Variable Valve Lift)
VVT	Değişken supap zamanlaması (Variable Valve Timing)
VVT-I	Akıllı değişken supap zamanlaması (Variable Valve Timing with intelligence)
VVTL-I	Akıllı değişken supap zamanlaması ve supap açıklığı sistemi (Variable Valve Timing and Lift Intelligent System)



1. GİRİŞ

Otomotiv sektörü (motorlu taşıt) dünya genelinde birçok sektörü etkileyen, iş hacmi ve istihdam açısından ekonomik katma değeri çok yüksek bir sektördür. Otomotiv sektörü (motorlu taşıt); yenilikçi ve rekabetçi yapısından dolayı çok fazla sayıda teknoloji barındıran endüstri dalları için yüksek katma değer üretiminde öncülük yapmaktadır. Uluslararası ticarete, piyasa ve rekabet koşullarındaki hızlı değişimler sektörü sürekli gelişim içinde olmaya zorunlu kılmaktadır. Bu süreçlerin Araştırma-Geliştirme faaliyetlerini tetiklemesi özelliklerinden dolayı da ülke ekonomileri açısından sektör son derece önemli ve stratejiktir.

Günümüzde insanların hayatını kolaylaştırmak için birçok çalışma yapılmakta olan otomotiv sektöründeki gelişmeler ile içten yanmalı motorların kullanımını artırmıştır. İçten yanmalı motorların kullanımındaki artış dünyadaki petrol rezervlerinin azalmasına neden olmakla birlikte hava kirlilik değerlerinde de artış meydana getirmektedir. İçten yanmalı motorlardaki en önemli problem yakıt tüketimi ve çevreye atılan zehirli gazlardır. İçten yanmalı motorlar üzerine yapılan çalışmalarla, araç performansı, yakıt tüketimi ve egzoz emisyon değerleri gibi birçok parametrede iyileştirmeler yapılsa da halen istenen seviyede değildir. Günümüzde bu parametreleri doğrudan etkileyen supap sistemlerinin üzerinde yoğun bir çalışma yapılmaktadır.

Supap sistemleri, içten yanmalı motorların farklı devirlerinde silindir içine optimum hava veya hava-yakıt karışımının alınmasını sağlayarak yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyon değerlerini iyileştirmektedir. Sabit supap sistemine sahip motorlarda, supaplar her devirde belirli bir zamana göre açılıp kapanmaktadır. Bu sebeple belirli bir devir aralığı haricinde farklı devirlerde performans, yakıt tüketimi ve egzoz emisyon değerleri kötüleşmektedir, dolayısıyla motor verimi olumsuz etkilenmektedir. Sabit supap sistemlerindeki bu olumsuz durumun ortadan kalmasını sağlamak amacıyla değişken supap sistemleri kullanılmıştır. Değişken supap sistemleri motorun farklı devirlerinde; supap zamanlamasını, supap açılma miktarını ve supap açık kalma süresinin optimum bir şekilde ayarlanması ile bahsedilen olumsuz durumun ortadan kalkmasını sağlamaktadır.

Günümüzde birçok otomotiv firması tarafından farklı değişken supap zamanlama sistemleri üretilmektedir. Kam miline bağlı olarak geliştirilen supap sistemlerinde

birtakım farklı özellikler mevcuttur. Farklı değişken supap sistemlerinde supapları erken veya geç açıp kapatma, supapların açılma miktarı ve supapların açık kalma süreleri ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Kam miline bağımlı bu sistemler, farklı motor devirlerinde krank milindeki sensörlerden gelen sinyallere göre supabın zamanlamasını, ne kadar açılacağını ve supabın ne kadar açık kalacağını belirlemektedir.

Kam miline bağımlı değişken supap zamanlama sistemleri, sabit zamanlı supap sistemlerine göre daha esnek bir çalışma aralığına sahip olsa da tamamen esnek bir yapıya sahip değildir. Kam mili ile supapların açılıp kapanması sağlanan sistemlerde, kam profilinden dolayı supap zamanlamasının değiştirilmesi ve motor devrine göre sistemin çalışması kısıtlanmış olur. Bu kısıtlamadan kurtulmak için kam milinden bağımsız çalışan elektromekanik supap mekanizmaları üzerinde günümüzde birçok çalışma yapılmaktadır.

Elektromekanik supap sistemleri, yaygın olarak kullanılan klasik kam mili kontrollü sistemlere göre daha üstün özelliklere sahiptir. Diğer değişken supap mekanizmalarına göre elektromekanik supap sistemlerinin yapısı daha basit ve üretim maliyeti daha düşüktür. Elektromekanik supap mekanizmaları elektrik, manyetik ve mekanik olmak üzere üç alt sistemin birbiriyle etkileşimiyle çalışmaktadır.

Elektromekanik supap sistemlerinde kam mili bulunmamaktadır. Dolayısıyla kam milinden kaynaklanan kayıplar bu sistemlerde meydana gelmemektedir. Elektromekanik supap sistemlerinde krank miline irtibatlandırılan konum sensörünün ürettiği sinyal sayesinde pistonun durumu Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU) tarafından değerlendirilerek, supabın ne zaman açılacağı, supabın ne kadar açılacağı ve supabın açık kalma süresi gibi parametreler optimize edilerek supabın açılıp-kapanması sağlanır.

Bu tez kapsamında KAMA KG 390 kıvılcım ateşlemeli motor referans alınarak elektromekanik kontrollü supap mekanizmasının tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. 12V besleme gerilimine sahip olacak şekilde tasarlanan elektromekanik supap sisteminde supapların yaklaşık 5,5-6 mm açılıp kapanması sağlanarak; gerilim, akım, manyetik kuvvet, supabın açılma miktarı ve basınç kuvveti gibi parametrelerin simülasyon sonuçları değerlendirilmiş ve bu parametreler arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Konu ile ilgili çalışmaların literatür incelemesi özetlendiğinde;

Akbaş A. vd., yapmış oldukları çalışmada, kıvılcım ateşlemeli bir motorda kullanılan değişken supap zamanlaması mekanizmalarına alternatif olarak bir prototip hazırlanmıştır. Deneysel çalışma, emme supabı kam milinde 30° avanstan 30° rötara göre farklı devirlerde (1600 dev/dk, 2800 dev/dk ve 3600 dev/dk) yapılarak volumetrik verim, moment, motor gücü ve özgül yakıt tüketimi gibi parametreler dikkate alınarak supap zamanlamasının motor performansına etkileri incelenmiştir (Akbaş vd., 2001).

Sher ve Bar-Kohany SI bir motorun, egzoz ve emme zamanları açısından, motor torkunun en üst seviyelere çıkarıp özgül yakıt tüketimini en aza indirmek ve CO ile NO_x seviyelerini motorun farklı yüklerdeki (%35 ile %100) değerleri için supap zamanlama tekniklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada gerçek bir SI çevrimini simüle eden MICE (Modeling Internal Combustion Engines) bilgisayar programı kullanılmıştır. Her supabın optimum zamanlaması motor yüküne ve motor hızına bağlı olduğu görülmüştür. VVT (Değişken supap zamanlaması) sayesinde motorun gücünde %6 artış, özgül yakıt tüketiminde ise %13 azalma olduğu ve VVT kullanıldığında düşük devirlerde daha yüksek tork elde edilebileceği görülmüştür (Sher ve Bar-Kohany, 2002).

Koch R.C. vd., yapmış oldukları çalışmada, içten yanmalı motorlarda gaz değişimi için kullanılan solenoidin modellenmesini ve kontrolünü yapmışlardır. Akustik gürültüyü ve mekanik aşınmayı önlemek, statik ve akı verilerini elde etmek için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Akı ve kuvvet verileri kullanılarak simülasyonu yapılan modelde kabul edilebilir darbe hızı ve ivmesi elde edildiği görülmüştür (Koch vd., 2002).

Şefkat, elektromekanik supap mekanizması tasarımında düz yüzlü disk tipi mıknatıs devresinin statik ve dinamik karakteristiklerini incelemiştir. Bu çalışmada mıknatıs devresinin matematik modeli elde edilerek mıknatıs geçirgenliğinin hesaba katıldığı ve katılmadığı durum için sistemin dinamik davranışını analiz etmiştir. Elektromekanik aygıtın dinamik karakteristikleri MATLAB/Simulink'te hazırlanan program ile elde edilmiştir. Yapılan analizlere göre kuvvet-hava arasındaki ilişki hava aralığı arttıkça mıknatıslanma kuvvetinde düşüş olduğu görülmüştür. Kuvvet-hava arasındaki ilişki göz

önüne alınarak düz yüzlü disk tipi devresinin çalışma aralığı belirlenmiştir. Gerilim arttıkça bobindeki akım dolayısı ile elektromekanik aygıtın cevap hızının arttığı görülmüştür (Şefkat, 2002).

Tao G. vd., yaptıkları çalışmada, yüksek cevap hızına sahip solenoid valflerin optimum tasarımı için çeşitli manyetik malzeme özellikleri ve geometri özelliklerinin valfin elektronik performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucu verilerine göre, yüksek cevap hızına sahip solenoid tasarımı için önerilen optimal tasarım yönteminin güvenilirliği ve doğruluğunun artabileceği, maliyetinin azaltılabileceğini ve cevap süresinin kısaldığını, dolayısıyla mühendislik amaçları için pratik değere sahip olduğunu göstermektedir (Tao vd., 2002).

Kamış, elektromekanik supap mekanizmalarında kullanılabilecek mıknatıs devrelerini araştırmış ve sistemin matematik modelini çıkarmıştır. Bu çalışmada, disk ve piston olarak adlandırılan iki farklı tip mıknatıs devresi ele alınarak üç model tasarlanmıştır. Tasarlanan modellerin statik ve dinamik özellikleri MATLAB/Simulink programından elde edilen sonuçlara göre analiz etmiştir. Yapılan çalışmalara göre disk tipi mıknatıs devresinin elektromekanik supap mekanizmalarında uygulanabilir olduğu tespit edilirken piston tipi mıknatıs devresinin uygun olmadığı sonucuna ulaşmıştır (Kamış, 2005).

Sağiroğlu, buji ateşlemeli tek silindri bir motorda emme supabının istenilen zamanda açılıp kapatılabilmesi için iki farklı sargı tipine göre elektromanyetik bir mekanizma hazırlamış ve imal etmiştir. İmal edilen mekanizma ile klasik kam mekanizması karşılaştırılarak volumetrik verim, hava-yakıt oranı, moment, motor gücü ve özgül yakıt tüketimi gibi parametreleri incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüksek hızlarda supap ve diskin sıçramasından dolayı elektromanyetik kumandalı sistemde, volumetrik verim, tork ve gücün azaldığını gözlemlemiştir (Sağiroğlu, 2006).

Gün, sabit supap mekanizması ile değişken supap zamanlamasının arasındaki farklılıkları incelediği çalışmada, değişken supap zamanlamasına sahip bir motorda değişken supap zamanlaması devre dışı bırakılarak, sabit supap zamanlı bir motor elde etmiştir. Değişken supap zamanlaması ve sabit supap zamanlamasının motor gücüne, özgül yakıt tüketimine, tekerlek çıkış gücüne ve kayıp güce olan etkileri deneysel olarak incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen değerlere göre düşük devirler ile 2700 dev/dk

aralığında değişken supap zamanlaması ile sabit supap zamanlaması arasında pek bir fark olmadığı ancak yüksek devirlere çıkıldığında değişken supap zamanlamasına sahip motorda, özgül yakıt tüketimi, tork ve güç değerlerinde artış olduğunu gözlemlemiştir (Gün, 2006).

Çınar ve Akgün, tek silindirli, dört zamanlı kıvılcım ateşlemeli bir motor için sadece emme supabı kapanma zamanını kontrol eden bir değişken supap mekanizması tasarımı yapmışlardır. Bu çalışmada, egzoz supabının açılma ve kapanma zamanı ile emme supabı açılma ve kalkma miktarı değiştirilmeksizin sadece emme supabı kapama zamanı değiştirilmiştir. Emme supabı kapanma zamanından sonra krank mili açısı 38° - 78° aralığında değiştirilerek motor devrine bağlı olarak moment, özgül yakıt tüketimi, volumetrik verim ve egzoz emisyon değerleri gibi parametrelerin değişimini incelemiştir (Çınar ve Akgün, 2007).

Chladny, yapmış olduğu çalışmada, içten yanmalı motorlarda verimliliği artırmak amacıyla supapları doğrudan kontrol etmek için solenoid bobin kullanmıştır. Bu çalışmada solenoid bobinlerin bir modelini oluşturarak MATLAB ve ANSYS programlarında simülasyonunu gerçekleştirmiş ve daha sonra da deneysel olarak analizini yapmıştır (Chladny, 2007).

Zhang ve Yang, yapmış oldukları çalışmada, uçak motoru için yüksek hızda çalışan solenoid valfin matematiksel modelini oluşturup daha sonra bu modelin MATLAB/Simulink'te simülasyonunu ve analizini yapmışlardır. Ayrıca sistemin tepki özelliklerini farklı bir yöntemle araştırmışlardır. Sistemde sarım sayısı, hava boşluğu ve sistemin eş değer devre direnci gibi parametrelerin yüksek hızlı solenoid valfin tepki süresi üzerindeki etkisini analiz etmiş ve araştırma sonucunda bu parametrelerin birbirleriyle etkileşim içinde olduğu gözlemlenmiştir (Zhang ve Yang, 2008).

Fontana ve Galloni, sundukları çalışmada değişken supap zamanlaması sisteminin potansiyelini araştırmıştır. Bu sistemde motor performansını, kısmi yük işlemindeki yakıt tüketimini optimize etmek amacıyla küçük hacimli bir motorda emme ve egzoz zamanını değiştirebilen kam sistemi (CVCP) tanıtılmıştır. Yük, VVT sistemi tarafından kontrol edildiğinde motor performansını ve supabın silindirdeki etkisi araştırmak için bir boyutlu ve üç boyutlu hesaplama modellerine dayanan sayısal bir yaklaşım benimsenmiştir.

Analiz edilen VVT sistemi, kısmi yükte pompalama kayıplarının dolayısıyla özgül yakıt tüketiminin azalmasını sağladığı, motor torkunun ve motor verimliliğini iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Fontana ve Galloni, 2009).

Sarıdemir, yapmış olduğu çalışma kapsamında iki silindirli, dört zamanlı buji ile ateşlemeli, 385 cm³ hacme sahip su soğutmalı bir motor için supap mekanizmasının tasarımını ve imalatını yapmıştır. Otomobil motorlarının supap sisteminde kullanılan kamların tasarımı için belirli parametreler belirlenmiştir. Klasik spline yöntemi ile üç farklı kam profili tasarlanarak motor için en uygun kam profilini belirlemeyi amaçlamış ve tasarlanan kam millerini motorun farklı devirlerinde analiz etmiştir. Kam profillerinin volümetrik verim, moment, özgül yakıt tüketimi, güç ve egzoz emisyon değerlerine olan etkileri incelenmiştir (Sarıdemir, 2009).

Lee D. vd., tarafından sunulan çalışmada, rölanti ve seyir gibi sabit koşul durumlarında VVT supap sistemi konumunu ve ateşleme zamanlamasını optimize etmek veya güncellemek amacıyla bir kontrolcü tasarlanmıştır (Lee vd., 2010).

Ma J. vd., yapmış oldukları çalışmada, elektropnömatik valf aktüatörünün matematiksel modelini oluşturup MATLAB/Simulink'te farklı çalışma koşullarında dinamik analizini gerçekleştirerek, sayısal simülasyon sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmışlardır (Ma vd., 2010).

Taşlıyol, önerdiği çalışmada iki farklı devirde (1200 dev/dk ve 3600 dev/dk), farklı avans değerleri ile farklı besleme gerilimleri (24V ve 48V) kullanarak emme supabını elektromanyetik şekilde tahrik ederek kam mili açısına göre supap zamanlamasını değiştirmiştir. 1200 dev/dk'da farklı açılma ve kapanma avans değerleri için 24V ve 48V besleme gerilimi uygulanmış ve her iki besleme değerinde açılma ve kapanma avans değerlerinde bir değişiklik görülmediği için 24V besleme gerilini tercih etmiştir. Aynı işlem 3600 dev/dk için tekrarlandığında 24V besleme geriliminin elektromekanik supap mekanizması için yetersiz olduğu, 48V besleme geriliminin ise uygun olduğu tespit edilmiştir. 48V besleme gerilimi, sistem için daha uygun olsa da bobinde oluşan zıt elektromotor kuvveti artmış ve bu nedenle supabın sıfır konumuna tam oturmadığını gözlemlemiştir. Buna ek olarak yüksek devirlerde istenilen supap açısı da elde edilememiştir. Sonuç olarak düşük devirlerde supap sisteminin besleme geriliminin

yüksek olmasına gerek olmadığı, yüksek devirlerde ise besleme geriliminin artması gerektiğini belirlemiştir (Taşlıyol, 2011).

Birgül ve Sekmen yaptıkları çalışmada, 12V'luk besleme gerilimine sahip bir elektromekanik sisteminin değişik supap çalışma aralığındaki dinamik performansı araştırmış ve içten yanmalı bir motor için destekleme limitlerini belirlemiştir. Elde edilen bulgulara göre hareketli kütle üzerine yapılacak olan geliştirmelerle birlikte sistemin daha etkin hale getirilebileceğini belirlemiştir (Birgül ve Sekmen, 2014).

Aygül, sunduğu çalışmasında buji ateşlemeli bir motorun geleneksel kam mekanizmasını çıkartıp yerine tasarladığı elektromekanik supap mekanizmasının montajını yaparak, farklı devirlerde (800 dev/dk, 1000 dev/dk ve 1200 dev/dk) farklı emme supabı açılma zamanlarında testler gerçekleştirmiştir. Bu testlerde silindir içi basınçları, emme supaplarının açık kalma süreleri ve emme bobininde harcanan güç miktarlarını ölçmüştür. Elde edilen sonuçlar teorik hesaplamalarla karşılaştırmış, farklı devir ve çevrimlerde emme supabının açılmasında ve kapanmasında yaklaşık %1 ile %9 değer aralığında gecikmeler olduğunu tespit etmiştir (Aygül, 2014).

Demir yapmış olduğu bu çalışmada, 4 zamanlı tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda klasik supap mekanizması ile elektromekanik supap (EMS) mekanizmasının farklı yüklerde (800W, 1600W, 2400W, 3200W ve 4000W) performans, kompresyon basıncı, özgül yakıt tüketimi ve egzoz emisyon değerlerini ölçerek karşılaştırmıştır. Standart supap sisteminde, supapların krank açısı devirden etkilenmezken EMS sisteminde motor devri azaldıkça supabın tam açık ve tam kapalı konuma gelmesinde süre kısalmıştır. Bu durum 1000 dev/dk sabit motor devrinde karşılaştırıldığında EMS sistemi 30° krank mili açısına karşılık gelen bir dönüş açısında tam açık konuma gelirken standart sistemde ise yaklaşık 100° krank mili açısına karşılık gelen bir dönüş açısında tam açık konuma geldiği görülmüştür. Silindir basınç testinde en yüksek kompresyon basıncı emme açılma sensörü alt ölü noktadan önce 20° konumunda elde edilmiştir. Klasik sistemde silindir basıncı 11,38 bar iken EMS sisteminde 12,41 bar olarak ölçülmüştür. Özgül yakıt tüketiminin EMS sisteminde %2,64 kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Hidrokarbon emisyonlarında EMS sisteminde %5,23 kadar, karbonmonoksit emisyonlarında ise %13,74 azalma göstermiştir. Azot oksit emisyon değerinde ise 2400W motor yüküne kadar EMS sistemi

ile klasik sistem arasında çok fark olmadığı, 3200W ve 4000W yüklerinde ise arttığını gözlemlemiştir (Demir, 2016).

Demir, yapmış olduğu deneysel ve nümerik çalışmada, Honda GX 390 marka dört zamanlı, tek silindirli buji ateşlemeli, klasik supap sistemine sahip olan bir motora EMS sistemi uygulanması durumunda volumetrik verimdeki değişimleri incelemiştir. Bu çalışmada, emme supabının açılmasının 5 ve 10 derece erken, egzoz supabının 5 derece erken ve 5 derece geç açılması sağlanarak farklı devirlerde motorun volumetrik verim değerleri elde edilmiştir. Elde edilen veriler sonucunda, EMS mekanizmasının klasik supap mekanizmasına göre düşük devirlerde volumetrik veriminin düştüğü, belirli bir devirden sonra ise volumetrik veriminin arttığını gözlemlemiştir (Demir, 2017).

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. İçten Yanmalı Motorlar

İçten yanmalı motorlar, bir yakıtın yakılması sonucuyla yakıtın kimyasal enerjisini krank mili çıkışında faydalı mekanik enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Bu sistemlerin büyük bir kısmı, pistonların silindir içinde hareket ettiği piston tipi motorlardır. İçten yanmalı motorlarda yanma işlemi, silindir içinde gerçekleşmektedir. Silindir içine alınan hava veya hava-yakıt karışımı pistonlar sayesinde sıkıştırılıp ateşlendikten sonra oluşan yüksek basınç, pistonları doğrusal hareket ettirerek biyel kolu yardımıyla hareket, krank milinde dönme hareketine dönüştürülür.

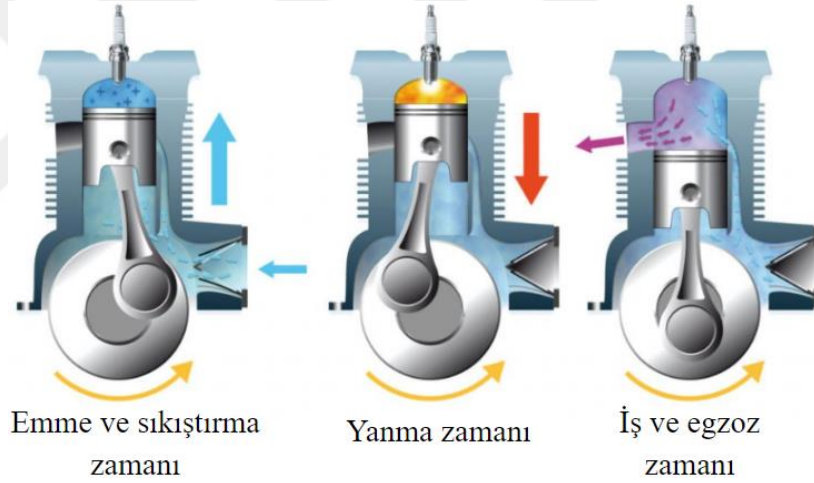
İçten yanmalı motorlarda yaygın olarak benzin ve dizel yakıt kullanılmaktadır. Benzin ile çalışan motorlar ve dizel ile çalışan motorlar arasında farklılıklar vardır. Benzinli motorlar ateşleme bakımından buji ateşlemeli, dizel motorlar ise sıkıştırma ateşlemeli motorlar olarak bilinmektedir. Benzinli motorlarda silindir içine alınan hava-yakıt karışımı buji ile ateşlenerek yanma gerçekleşirken dizel motorlarda silindir içine sadece hava alınır ve enjektörler aracılığıyla sıkıştırılan havaya yakıt püskürtülerek yanma işlemi gerçekleşmektedir.

Günümüzde yaygın olarak taşıtlarda kullanılan dört zamanlı benzinli motorun çalışma prensibi, 1876 yılında Nikolaus August Otto tarafından yapılmıştır. İçten yanmalı motorlar ilk olarak 1880'li yıllarda otomobillerde kullanılmaya başlanmış ve bu yıllarda iki zamanlı çevrime göre çalışan motorlarda kullanışlı hale getirilmiştir (Pulkrabek, 2016).

3.2. İçten Yanmalı Motorlarda Zaman

İçten yanmalı motorlarda zaman kavramı, kimyasal enerjinin mekanik enerjiye çevrilme sürecindeki aşamaları oluşturan süreçleri üretmektedir. Silindir içerisinde yakıtın yakılması sonucu üretilen ısı enerjisinin piston biyel mekanizması ile krank milinde mekanik dönme hareketine dönüşünü hazırlayan süreçler motorlarda zaman olarak ifade edilmektedir. İçten yanmalı motorlar çevrim tipine göre iki zamanlı ve dört zamanlı olmak üzere iki gruba ayrılır.

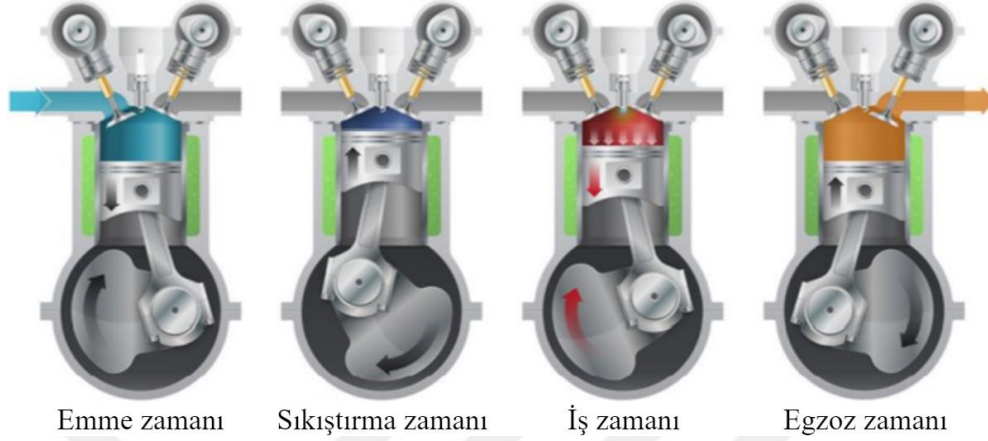
İki zamanlı motorlarda her bir çevrim, pistonun üst ölü nokta (ÜÖN) ile alt ölü nokta (AÖN) arasında iki strok hareketi yapmasıyla meydana gelir. Emme ve sıkıştırma bir strokta gerçekleşirken, iş ve egzoz diğer strokta gerçekleşir. İki zamanlı motorlarda supap bulunmamaktadır. Silindir içine alınmak istenen dolgu ve dışarıya atılmak istenen yanmış egzoz gazları, port adı verilen pencereler vasıtasıyla gerçekleştirilir. Pistonun alt ölü nokta ile üst ölü nokta arasında gerçekleştirdiği her bir hareketinde iki zaman oluşur. Piston, alt ölü noktadan üst ölü noktaya çıkarken egzoz ve emme portlarını kapatarak emme ve sıkıştırma zamanını oluşturur. Piston, üst ölü noktaya gelmeden hemen önce ateşleme işlemi gerçekleşir ve üst ölü noktadan alt ölü noktaya inerken iş zamanı ile egzoz zamanını oluşturur. İki zamanlı motorlarda krank mili bir tur döndüğünde (360°) emme, sıkıştırma, yanma ve egzoz zamanları tamamlanır. Şekil 3.1’de iki zamanlı benzinli motorun çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 3.1. İki zamanlı benzinli motorun çalışma prensibi

Dört zamanlı motorlar; endüstri, tarım ve ulaşım başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılan makinelerdir. Dört zamanlı motorlarda bir çevrim dört strokta gerçekleşir. Piston alt ölü nokta ile üst ölü nokta arasında aşağı veya yukarı yönlü hareketini dört kez gerçekleştirmesi sonucu bir çevrim oluşur. Teorik çevrimde her bir zaman 180° krank mili açısını ifade eder ve 720° krank mili açısında dört zaman gerçekleşerek bir çevrim meydana gelir. Krank milinin iki devir dönmesi ile bir çevrim gerçekleşmiş olur. Dört zamanlı motorlarda her strokta bir zaman meydana gelir. Bu zamanlar sırasıyla; emme zamanı, sıkıştırma zamanı, iş ve egzoz zamanıdır. Şekil 3.2’de

benzinli motorun emme, sıkıştırma iş ve egzoz zamanlarında supapların ve pistonun konumları verilmiştir.



Şekil 3.2. Dört zamanlı benzinli motorun çalışma prensibi (Shahid vd., 2019)

Emme zamanı, dört zamanlı içten yanmalı motorların çevrim başlangıcıdır. Yanma odasına hava veya hava-yakıt karışımının alındığı zamandır. Pistonun üst ölü noktadan alt ölü noktaya inışı sırasında vakum etkisiyle silindire dolgu işlemi gerçekleşir. Bu zamanda emme supabı açık, egzoz supabı ise kapalıdır.

Sıkıştırma zamanı, emme zamanı tamamlandıktan sonra piston alt ölü noktadan üst ölü noktaya kadar sıkıştırma işleminin gerçekleştiği zamandır. Bu zamanda emme supabı ile egzoz supabı kapalı haldedir. Tutuşma işlemi, sıkıştırma zamanının bitimi ile iş zamanının arasında gerçekleşmektedir. Piston alt ölü noktadan üst ölü noktaya çıkarken hacim azalırken silindir içindeki karışımın sıcaklık ve basıncı artar. Benzinli motorlarda bu sıcaklık ve basınç karışımının tutuşması için yeterli olmadığından piston üst ölü noktaya gelmeden kısa bir süre önce buji yardımıyla ateşleme yapılır. Dizel motorlarda ise oluşan sıcaklık ve yüksek basınçta karışım kendiliğinden tutuşmaktadır.

İş (Genişleme) zamanı, sıkıştırma zamanının sonunda yüksek sıcaklık ve basınçta yanmaya başlayan karışım, genişleme zamanında yanmanın etkisi ile oluşan sıcaklık ve basınç sayesinde piston üst ölü noktadan alt ölü noktaya hareket eder. Bu durumda emme ve egzoz supapları tamamen kapalıdır. Piston alt ölü noktaya gelmeden kısa bir süre önce egzoz supabı açılır. Bu açılmanın nedeni, silindir içi basıncın atmosfer basıncından yüksek olduğu için yanmış egzoz gazlarının kendiliğinden dışarıya çıkmasını

sağlamaktır. Bu sayede silindir içinde kalan artık gaz kütlelerinin en düşük düzeye inmesi gerçekleşir.

Egzoz zamanı, iş zamanının sonunda piston alt ölü noktaya gelmeden egzoz supabı açılarak yanmış egzoz gazlarının kendiliğinden dışarıya atılması sağlanır ve iş zamanı sonucunda alt ölü noktada bulunan piston, üst ölü noktaya doğru hareket ederek bir süpürme işlemi gerçekleştirir. Bu işlem sonucunda silindir içinde kalan egzoz gazları atmosfere atılır. Egzoz zamanı tamamlanmadan kısa bir süre önce emme supabı açılarak, supap bindirmesi meydana gelir. Supap bindirmesi sayesinde egzoz gazları dışarıya atılırken bir miktar egzoz gazının emme manifolduna girmesi sağlanarak yanma işlemi iyileştirilir.

3.3. İçten Yanmalı Motorlarda Supaplar

İçten yanmalı motorlarda, dört zamanın oluşması supaplar ve supap mekanizmaları sayesinde gerçekleşmektedir. Supaplar, içten yanmalı motorlarda en zorlu konumda ve en zorlu şartlar altında çalışan parçalardır. Sürekli çok yüksek sıcaklıklara, basınca ve darbe şeklinde mekanik etkilere maruz kalarak çalışmaktadırlar. Özellikle egzoz supabı tablası yüksek yanma sonu sıcaklığı etkisi altında çalışmaktadır. Emme supaplarının silindir içine alınan soğuk hava veya hava-yakıt karışımının sayesinde egzoz supaplarına göre daha soğuk bir ortamda çalışmasına rağmen sıcaklığı yaklaşık 500°C'ye ulaşmaktadır. Egzoz supapları, silindirden dışarıya atılan yanmış egzoz gazları sebebiyle daha yüksek ısılarla maruz kalmaktadır. Egzoz supaplarının sıcaklığı yaklaşık 800°C'ye kadar yükselmekte ve kimyasal aşınmaların etkisi altında kalmaktadır. Supapların aşınmadan, eğilmeden ve erimeden çalışabilmeleri için supaplar soğutulmalıdır. Supapların çalışma sıcaklığına uygun soğutma işlemi gerçekleşmemesi durumunda supapların boyları uzar ve tabla kısmı tam olarak yerine oturmaz, buna bağlı olarak sızdırmazlık görevi, silindir içi basıncı sağlanamazken beklenen motor performansının çok uzağında kalır (Yardımcı, 2008).

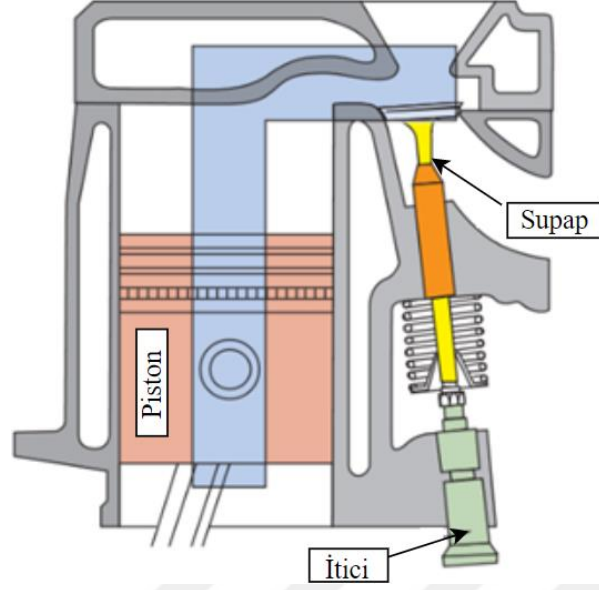
İçten yanmalı motorlarda supaplar, dört zamanın oluşumu sırasında silindirlere hava veya hava-yakıt karışımının alınmasında ve engellenmesinde büyük rol oynamaktadır. Emme supapları, emme zamanında açık kalarak silindir içine hava veya hava-yakıt karışımının alınmasını sağlarken egzoz supapları da egzoz zamanında açık kalarak yanmış egzoz gazlarının silindirden tahliyesini sağlar. Emme ve egzoz supapları sıkıştırma ve iş

zamanlarında kapalı konumda bulunarak, silindir içinde optimum basıncın oluşmasını sağlar.

İçten yanmalı motorlarda, üreticiler tarafından farklı supap mekanizmaları geliştirilerek birçok parametrede iyileştirmeler yapılmıştır. Farklı supap mekanizmalarında supapların, açılıp kapanma zamanları, açılma miktarları ve açıklık süresi gibi parametreler kontrol edilmiştir. Supap sistemlerinde, hava veya hava-yakıt karışımının silindir içine daha fazla miktarda alabilmesi için, emme supapları egzoz supaplarından daha büyük üretilmiştir. İçten yanmalı motorlarda, yüksek performans elde edilmek amacıyla farklı supap sayıları görülmektedir. Emme ve egzoz supap sayılarının artması ile birlikte silindir içine daha fazla dolgu alınıp, silindir içine alınan dolgunun yanması sonucuyla oluşan atık egzoz gazlarının en üst düzeyde silindir dışına atılması sağlanmıştır. Motorlu taşıt üreticileri araştırma ve tasarımlarına göre her bir silindirde; 1 emme 1 egzoz, 2 emme 1 egzoz, 2 emme 2 egzoz, 3 emme 2 egzoz supabı bulunan motorlar üretmişlerdir.

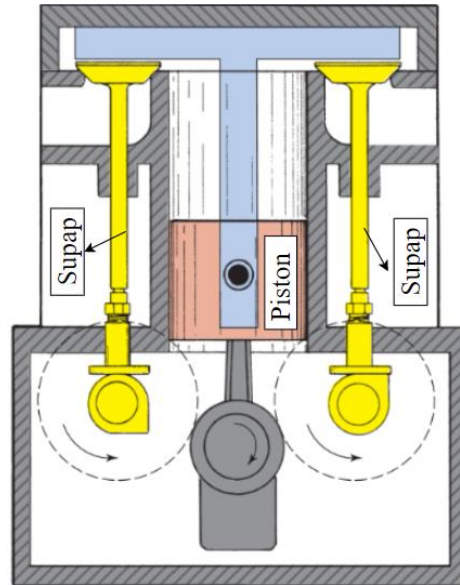
İçten yanmalı motorların sınıflandırılması birden fazla şekilde yapılabilmektedir. Bunlardan bir tanesi de supapların motor üzerinde bulunduğu yere ve konuma göre yapılmaktadır. Supap tasarımına göre motorlar; L tipi, T tipi, F tipi ve I tipi motorlar olarak sınıflandırılmaktadır. I tipi supap sistemi çok yaygın olarak yeni nesil motorlarda kullanılmaktadır. Ancak bazı enerji santrallerinde veya küçük motorlarda L tipi, T tipi, F tipi supap sistemleri halen kullanılmaktadır (Stockel vd., 2014).

L tipi motorlar, günümüzde içten yanmalı motorlardaki çoğu supap pozisyonuna göre ters şekilde çalışmaktadır. Supap başı yukarıda, supap sapı aşağı kısımda bulunur. L tipi motorlarda emme ve egzoz supabı motor bloğunun aynı kısmında bulunur. L tipi supap mekanizması kullanılan motorlarda kam mili motor bloğu içerisine yerleştirilmiştir ve supap sistemi hareketini motor bloğu içerisindeki kam milinden alır. Kam mili hareketini krank mili dişlisinden alarak çalışmaktadır. Krank mili ile kam mili arasında dişli ile hareket iletimi sağlandığından bu durum parça sayısını ve arıza olasılığını azaltmaktadır. Krank mili 2 devir yaptığında kam mili 1 devir yapmaktadır. L tipi motorlarda yanma odaları çok büyük olduğundan dolayı sıkıştırma oranları düşüktür. Dolayısıyla motor gücü oldukça düşük kalmıştır. Emme ve egzoz supabı ile emme ve egzoz manifoldu bu tip motorlarda aynı tarafta bulunduğu için silindir içine alınan havanın aşırı ısınması sistemin volumetrik verimini düşürmektedir. Şekil 3.3'te L tipi supap sistemi verilmiştir.



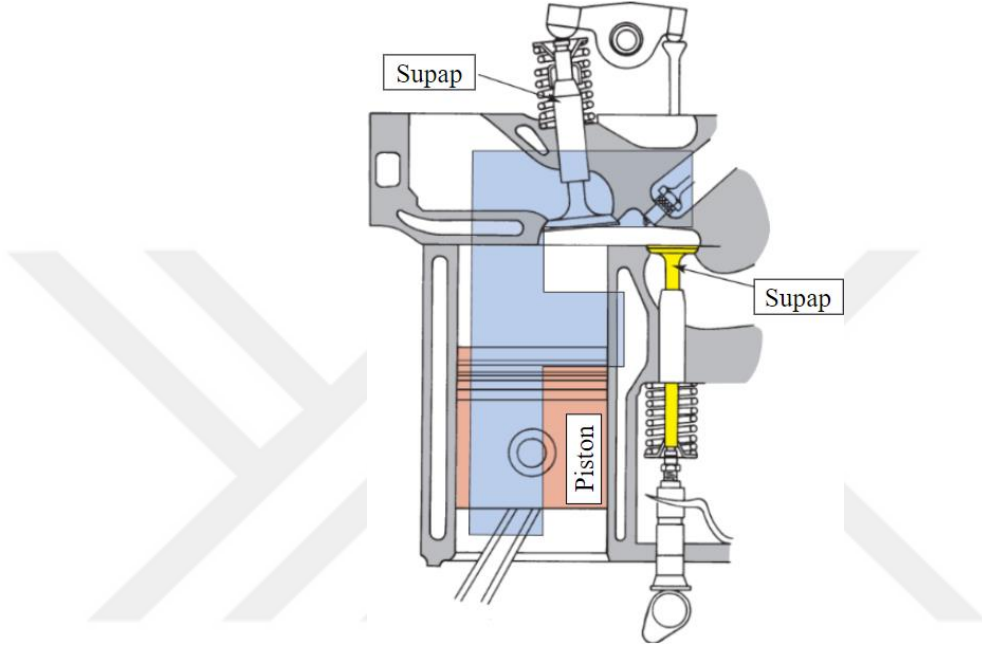
Şekil 3.3. L tipi supap sistemi (Stockel vd., 2014)

T tipi motorlarda, supaplar motor bloğunun her iki tarafına yerleştirilmiştir. Supaplar L tipi motorlarda olduğu gibi ters pozisyonda çalışmaktadır. T tipi motorlarda egzoz ve emme supaplarının farklı yerde bulunmasından dolayı motorda iki adet eksantrik mil bulunmaktadır. Bu durum parça sayısı, ağırlık ve maliyet açısından sistemi olumsuz etkilemektedir. L tipi motordaki emme supabı ile egzoz supabının aynı kısımda bulunmasına karşın bu motorda farklı kısımlara konularak, volumetrik verimde iyileştirme sağlanmıştır. Şekil 3.4'te T tipi supap sistemi verilmiştir.



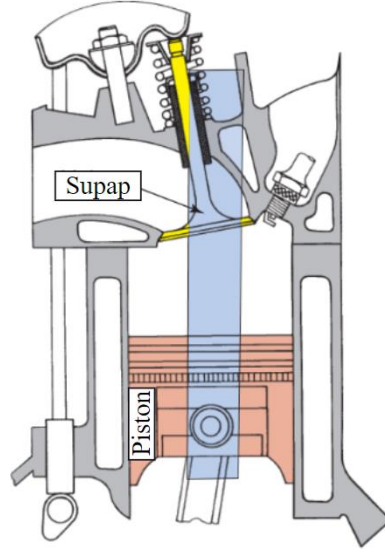
Şekil 3.4. T tipi supap sistemi (Stockel vd., 2014)

F tipi motorlarda emme supapları silindir kapağında konumlandırılırken, egzoz supapları motor bloğunda bulunur. F tipi motorlarda ilk kez emme supapları aşağı yönlü çalışmaya başlamıştır. Emme ve egzoz supaplarının birbirinden uzaklaşması, daha büyük supapların kullanılmasına imkân sağlayıp, silindir içine alınan havanın fazla ısınmamasından dolayı motor verimini arttırmıştır. Şekil 3.5’te F tipi supap sistemi verilmiştir.



Şekil 3.5. F tipi supap sistemi (Stockel vd., 2014)

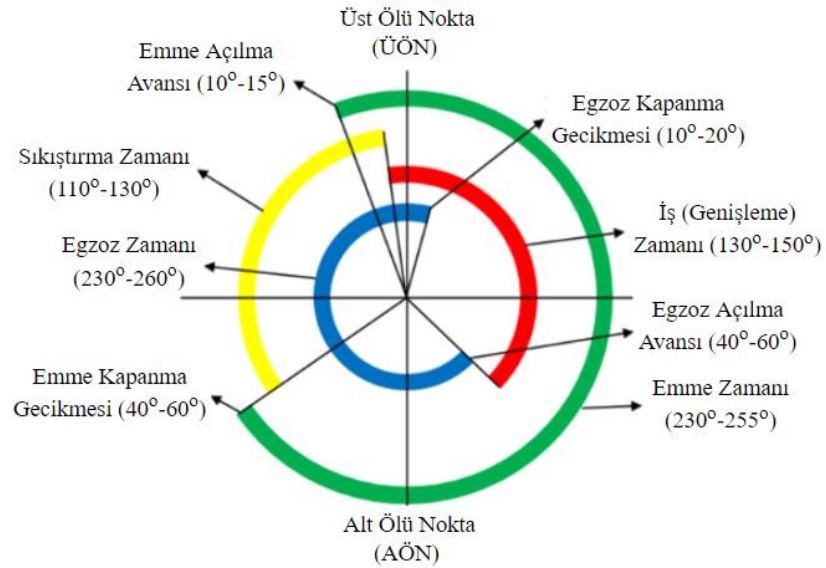
Diğer supap sistemlerine göre yeni nesil motorlarda çok yaygın olarak kullanılan I tipi supap sistemli motorlarda emme ve egzoz supabı silindir kapağı üzerinde yer almaktadır. İçten yanmalı motorlardaki gelişmelere bağlı olarak I tipi supap sistemleri sürekli bir gelişim içerisinde ve silindir kapağı üzerinde OHC (Overhead Camshaft) veya DOHC (Double Overhead Camshaft) şeklinde üreticinin tasarımına göre değişiklik göstermektedir. Silindirlerde kullanılan supap sayısına bağlı olarak farklı supap ve kam mili tasarımları yapılmaktadır. Bu motorlarda supaplar aşağı yönlü olmakla birlikte külbütör mekanizmasıyla çalışır. Eksantrik mili motor bloğunda bulunduğu için, külbütör kolu ile eksantrik mili arasında uzun supap iticileri kullanılmıştır. Supap başının silindir içine girmesi daha küçük yanma odalarının tasarlanmasına imkân sağlamıştır. Dolayısıyla motorların sıkıştırma oranları artırılmıştır. Eksantrik mil ile supaplar arasındaki mesafenin fazla olması ve arada çok fazla parça olması, motor gücünü sınırlandırmıştır. Şekil 3.6’da I tipi supap sistemi verilmiştir.



Şekil 3.6. I tipi supap sistemi (Stockel vd., 2014)

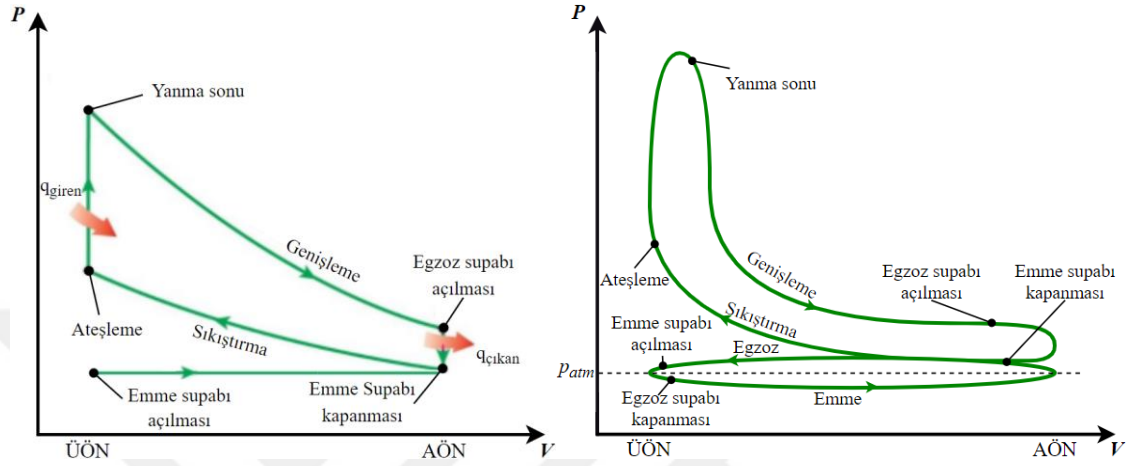
3.4. İçten Yanmalı Motorlarda Supap Zamanlaması

İçten yanmalı motorlarda emme, sıkıştırma, iş ve egzoz zamanlarının belirlenmesi için supap zamanlaması çok önemlidir. Emme ve egzoz supaplarının açılıp kapanma zamanları motor performansını ve egzoz emisyon değerlerini önemli derecede etkilemektedir. Yeni nesil motorlarda yaygın olarak dört zamanın belirlenmesi için krank mili konum sensörü ECU'ya bilgi gönderir ve krank mili konumuna bağlı olarak supapların açılıp kapanma zamanları kam mili tarafından gerçekleştirilir. Şekil 3.7'de supap zaman ayar diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.7. Supap zaman ayar diyagramı (Demir, 2017)

Teorik supap zaman ayar diyagramında her zaman 180° devam ederken pratik de her zaman 180° devam etmemektedir. Motor devrine göre belirlenen bu süreç bazı zamanlarda 180° 'den uzun sürerken bazı zamanlarda ise 180° 'den kısa sürmektedir. Şekil 3.8'de sırasıyla teorik ve pratik Otto çevrimi verilmiştir.



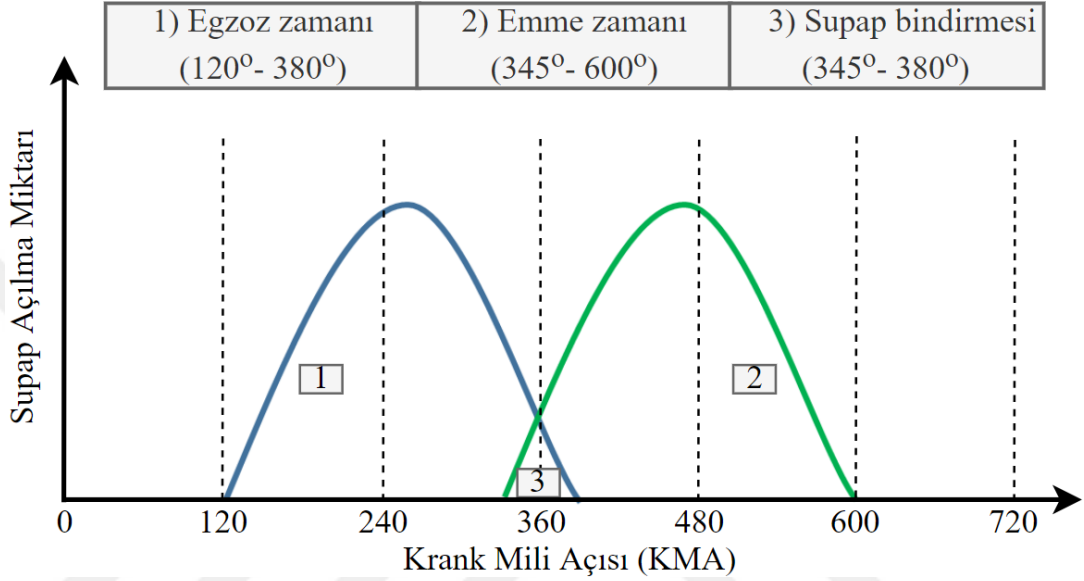
Şekil 3.8. Teorik ve pratik Otto çevrimi

Şekil 3.7'de emme zamanı incelendiğinde, emme supabı üst ölü noktadan 10° - 15° önce açılırken, alt ölü noktadan 40° - 60° sonra kapanmaktadır. Emme supabının erken açılıp geç kapanmasının temel nedeni silindir içine daha fazla hava veya hava-yakıt karışımının alınması sağlanarak volumetrik verimin artırılmasıdır. Teorikte 180° olan emme zamanı gerçekte yaklaşık 230° - 255° olmaktadır. Bu durum sayesinde silindir içine maksimum hava veya hava-yakıt karışımı alınmış olur.

Egzoz supabının erken açılması, yanma işleminin gerçekleşmesi sonucunda açığa çıkan egzoz gazlarının basıncı, atmosfer basıncından yüksek olduğu için egzoz gazlarının kendiliğinden dışarıya çıkmasını sağlamak amacıyla piston alt ölü noktaya gelmeden kısa bir süre önce egzoz supabı açılır. Egzoz supabı alt ölü noktaya gelmeden açılmaması durumunda piston, silindir içindeki egzoz gazlarının uyguladığı negatif işe maruz kalır (Demir, 2017).

Egzoz supabının geç kapanması ile emme supabının erken açılması esnasında her iki supabında açık kalması durumunda supap bindirmesi meydana gelir. Bu olay sayesinde bir miktar yanmış egzoz gazları emme manifolduna girerek silindir içine alınacak olan hava veya hava-yakıt karışımını ısıtarak yanmayı iyileştirir. Egzoz supabının geç

kapanması, supap bindirmesini direkt olarak etkileyeceği için iyi optimize edilmeli aksi takdirde yanmış egzoz gazları silindir içinde yer kaplayacağı için silindir içine alınan hava veya hava-yakıt karışım miktarı azalır ve yanma kötüleşir. Şekil 3.9’da supap bindirmesi ile egzoz ve emme supaplarının açılıp kapanma eğrileri Şekil 3.7’deki supap zaman ayar diyagramı dikkate alınarak verilmiştir.



Şekil 3.9. Emme-egzoz zamanları ve supap bindirmesi

3.4.1. Supap zamanlamasının volumetrik verime etkisi

İçten yanmalı motorlarda, performans ve güç gibi parametreleri doğrudan etkileyen en önemli işlemlerden biriside her çevrim sırasında silindire maksimum miktarda hava veya hava-yakıt karışımı almaktır. Silindir içine alınan hava miktarı ne kadar fazla olursa silindir içinde o kadar fazla yakıt yakılarak daha fazla enerjinin efektif güce dönüşmesi sağlanır. Silindir içine alınan hava miktarının, silindir hacmine oranı volumetrik verim olarak ifade edilmektedir. Motor devri, motor tasarımı, emme supap sayısı, supap tablası büyüklüğü, supap zamanlaması gibi faktörler volumetrik verimi etkileyen temel parametrelerdir.

Supap zamanlaması sayesinde silindir içine alınan hava veya hava-yakıt karışım miktarının en üst düzeyde olması volumetrik verimi arttırmaktadır. Dolayısıyla supap zamanlamasının volumetrik verime etkisi oldukça fazladır. Supap zamanlaması sayesinde silindir içine alınan karışım ile yanma zamanından sonra silindir içinde açığa çıkan

yanmış egzoz gazlarının tahliyesi optimize edilerek, tahliye işleminin en uygun zamanda gerçekleşmesi sağlanır ve silindir içine alınacak hava veya hava-yakıt karışımının maksimum seviyede olması sağlanır (Pulkrabek, 2016).

3.4.2. Supap zamanlamasının özgül yakıt tüketimine etkisi

İçten yanmalı motorlarda güç, motorun birim zamanda yaptığı iş olarak tanımlanır. İçten yanmalı motorlarda birim güç başına harcanan yakıt miktarı özgül yakıt tüketimi ile ifade edilmektedir. Özgül yakıt tüketimi, motor devrinin artması ile birlikte ilk başta azalmaya başlar ve daha sonra yüksek devirlere çıkıldıkça artar. Motorlarda dolgunun en üst düzeyde olduğu devirde motor momenti, birim zamanda en fazla işin yapıldığı devirde motor gücü en yüksek değerine ulaşmaktadır. Düşük devirlerin orta devirlere göre özgül yakıt tüketiminin yüksek olmasının nedeni çevrimin daha uzun sürede tamamlanmasına bağlı olarak, sürtünme ve ısı kayıplarının artmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek devirlerde ise sürtünme kayıplarının çok yüksek olması yine özgül yakıt tüketimini arttırmaktadır. Supap zamanlaması sayesinde düşük, orta ve yüksek devirlere göre silindir içine alınan hava veya hava-yakıt karışımı optimize edilerek özgül yakıt tüketiminin düşürülmesi sağlanabilir (Pulkrabek, 2016).

3.5. İçten Yanmalı Motorlarda Supap Mekanizmaları

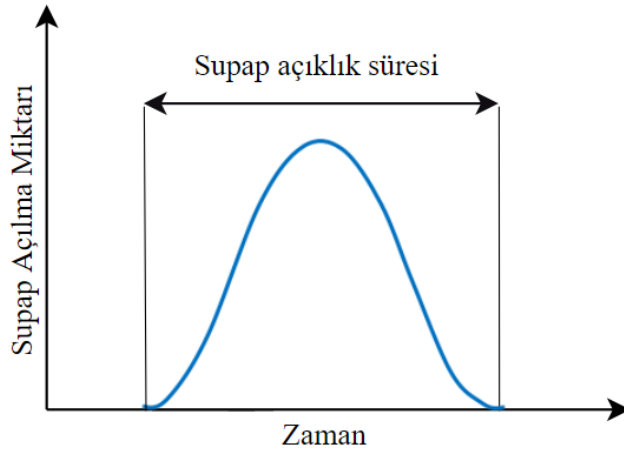
İçten yanmalı motorlarda, dört zamanın gerçekleşmesi supap kontrol mekanizmaları sayesinde oluşmaktadır. Supap mekanizması, zaman ayar mekanizması ile birlikte silindir içindeki piston durumuna göre supapları açıp kapatarak dört zamanın oluşmasını sağlamaktadır. Hava-yakıt karışımının silindire alınması ve yanma sonucu oluşan gazların uygun zamanlamayla silindirden atılmasını kontrol eden emme ve egzoz supabını çalıştırmak için tasarlanmış bir sistemdir.

Supap mekanizmaları üzerine günümüzde birçok çalışma yapılmaktadır. Supap mekanizmaları; supapların açılma-kapanma zamanını, açık kalma süresini ve açık kalma miktarının değişken olarak ayarlanması ile motor performansı, yakıt tüketimi ve emisyon değerleri gibi birçok parametrede iyileştirme sağlamaktadır. Sabit zamanlı supap mekanizmaları, motor orta devirlerde çalışacak şekilde tasarlandığı için düşük devirlerde ve yüksek devirlerde performans kötüleşmektedir. Bu kötüleşmenin sebebi supap açılma

mesafesinin her motor devri için sabit kalmasına karşın supap açık kalma süresinin motor devri değişimine bağlı olarak değişmesidir. Kam açıları yüksek performansa göre üretildiği zaman orta ve düşük devirlerde performans kötüleşip yakıt sarfiyatı artarken, kam açıları orta devirlerde çalışacak şekilde ayarlandığında ise yüksek performansa erişilemediğinden yine yakıt sarfiyatı artışı meydana gelmektedir. Sabit zamanlı supap mekanizmalarında düşük devirlerde silindir içine alınacak olan karışım için yeterli miktarda zaman olsa da yüksek devirlerde, supap zamanlaması sabit olduğundan dolayı gerekli karışımı silindir içine almak ve yanmış egzoz gazlarının tahliyesi için yeterli zaman yoktur. Farklı devirlerde bu zamanların optimum şekilde ayarlanması için VVT (Variable Valve Timing) sistemi yani değişken supap zamanlaması kullanılmaktadır.

3.5.1. Supap açıklık süresi

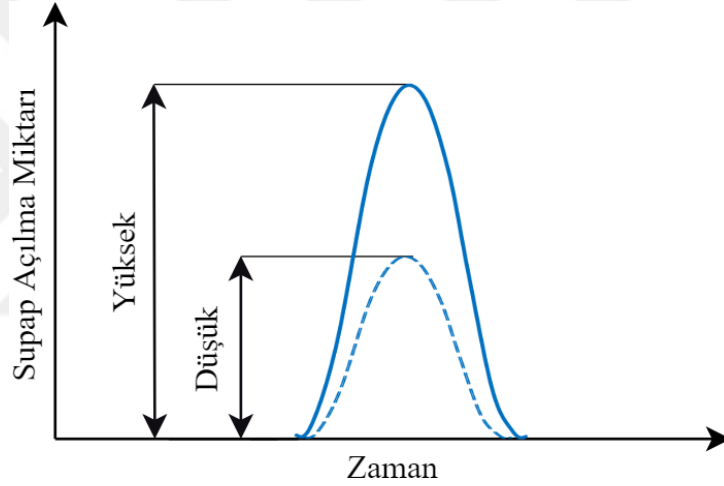
Supap açıklık süresi, emme supabı ile egzoz supabının kapalı konumdan açık konuma geçtiği zaman olarak adlandırılmaktadır. Supap açıklık süresi; yakıt tüketimi, motor performansı, egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi açısından içten yanmalı motorlar için oldukça önemlidir. Yukarıda ifade edilen motor karakteristik özellikleri elde edebilmek için yüksek devirlerde avans verilerek supapların erken açılması sağlanır ve supapların açık kalma süresi arttırılır. Silindir içerisine alınan hava veya hava-yakıt karışımının, yani volümetrik veriminin iyileştirilmesi sonucunda silindir içine daha fazla hava-yakıt karışımının alınması sağlanır. Düşük devirlerde ise rötar verilerek supapların açık kalma süresi azaltılır. Bu sayede yakıt sarfiyatı ve performans gibi parametrelerde iyileşmeler meydana gelir. Şekil 3.10'da supap açıklık süresi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Supap açıklık süresi

3.5.2. Supap açılma miktarı

Supap açılma miktarı, supabın kapalı konum ile supabın açıldıktan sonraki konumu arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Supap açılma miktarı, yüksek devirlerde silindir içine alınan hava veya hava-yakıt karışımının miktarını belirleyen önemli bir faktördür. Yüksek devirlerde silindir içine alınan karışım miktarının fazla olmasını ister. Bu yüzden supap açılma miktarı daha fazla olur. Düşük devirlerde daha fazla türbülans meydana gelmesi istendiği için supap açılma miktarının az olması ister. İçten yanmalı motorlarda supap açılma miktarı farklı devirler için optimize edilerek yanmanın iyileştirilmesi sağlanabilir. Şekil 3.11’de supap açılma miktarı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Supap açılma miktarı

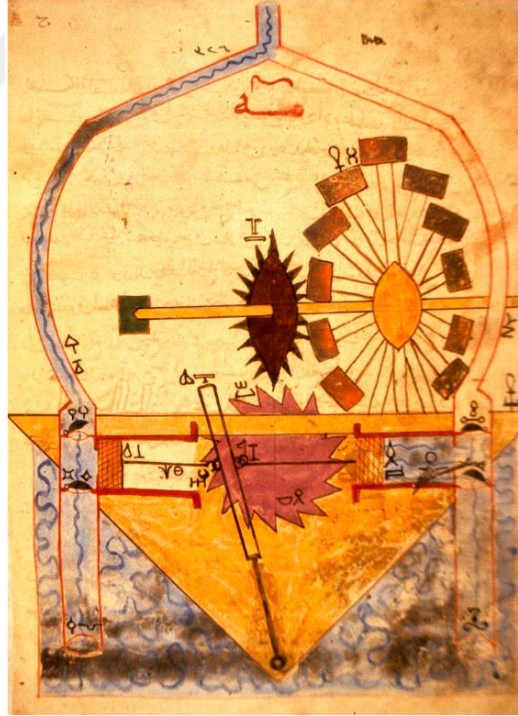
3.6. Değişken Supap Zamanlaması ve Sınıflandırılması

Değişken supap zamanlaması, motorun farklı devirleri için silindir içine alınan hava veya hava-yakıt karışımının yeteri miktarda alınabilmesi ve yanmış egzoz gazlarının tahliyesi için gerekli kam açısını vererek, motor performansını, yakıt tüketimini ve egzoz emisyon değerleri gibi parametrelerde iyileştirmeler yapılmasını sağlar. Değişken supap zamanlamasındaki bir diğer hususta supap bindirme sürelerini ayarlayarak, silindir içine alınacak olan hava veya hava-yakıt karışımını belirleyerek, supabın açık kalma süresini ve açık kalma miktarını belirler. Günümüzde bu alanda birçok uygulama vardır. Bu uygulamalarda, supap zamanlaması, supap açılma miktarı ve supapların açık kalma süresi değişken şekilde ayarlanabilmektedir.

Değişken supap zamanlaması, kam miline bağımlı (kam fazının kaydırıldığı, supap yüksekliğinin değiştirildiği, kam fazının kaydırıldığı ve supap yüksekliğinin değiştirildiği sistemler) ve kam milinden bağımsız sistemler (elektromekanik, elektrohidrolik, elektropnömatik sistemler) olmak üzere iki gruba ayrılır.

3.6.1. Kam miline bağımlı değişken supap sistemleri

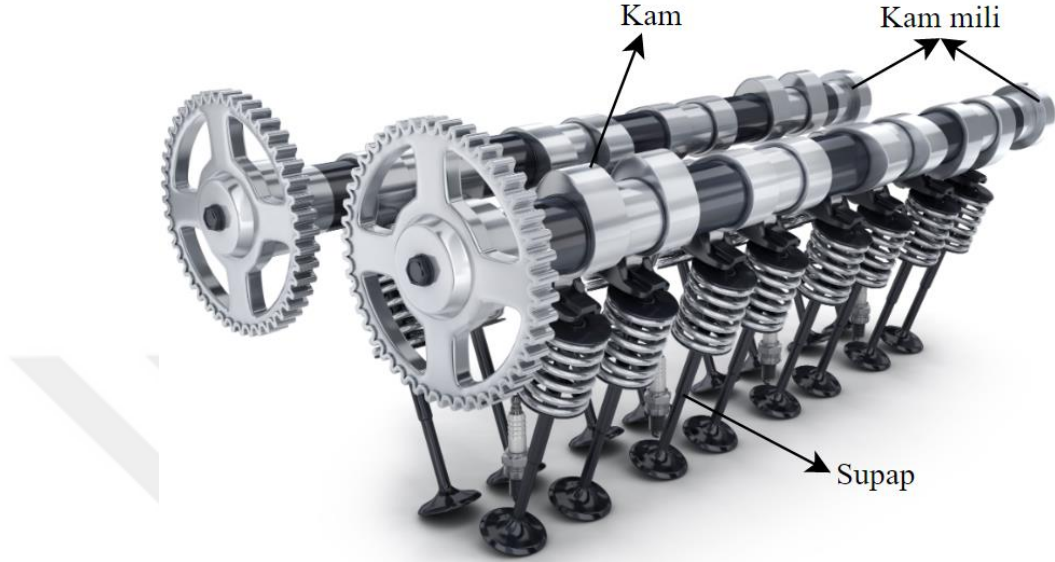
Kam mili uygulamalarına bakıldığında; kam mili ilk defa El-Cezeri tarafından 1206 yılında tasarlanarak su yükseltme makinelerinin ve su saatlerinin bir parçası olarak uygulanmıştır. Kam ve kam mili uygulamaları daha sonra 14. Yüzyıldan itibaren Avrupa kıtasında yapılan mekanik sistemlerde görülmektedir. El-Cezeri'nin 1206 yılında yapmış olduğu çift yönlü çalışma prensibine sahip pistonlu pompa, suyu çeken borulara sahip ilk pompa olarak bilinmektedir ve kam sistemi ilk defa bu makinede kullanılmıştır (Nadarajan, 2007). Şekil 3.12'de El-Cezeri tarafından yapılan pistonlu pompa verilmiştir.



Şekil 3.12. Pistonlu pompa (El-Cezeri, 1990)

İçten yanmalı motorlarda bulunan değişken supap zamanlama sistemlerinde kam mili yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kam milindeki kamlar sayesinde supapların açılıp kapanması sağlanırken aynı zamanda supap açılma miktarı, supapların erken veya geç

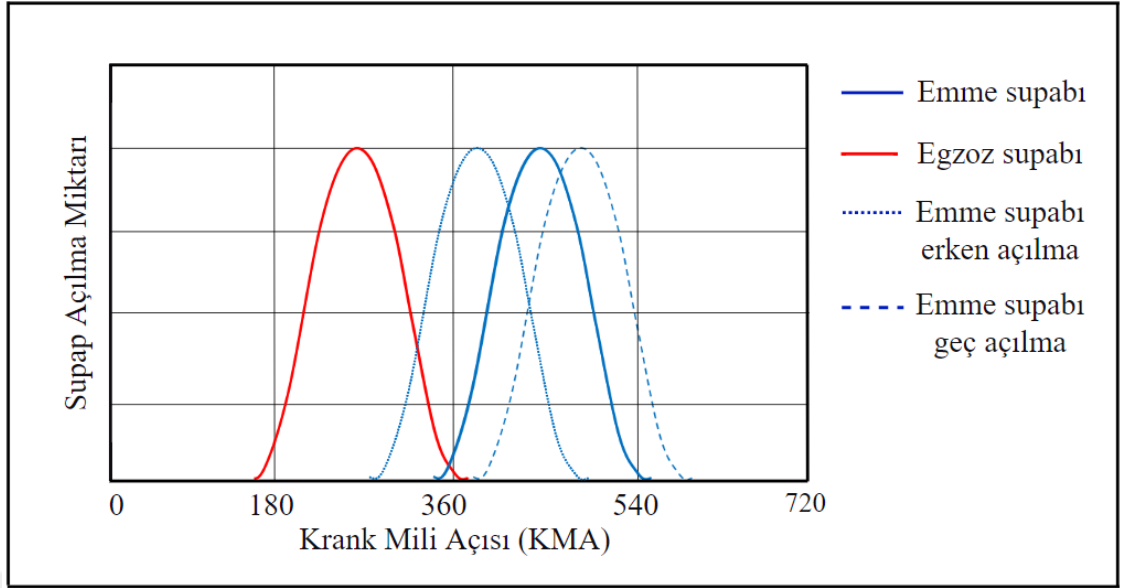
açılıp kapanması ve supap açıklık sürelerinin de değiştirilmesine imkân sağlamıştır. Şekil 3.13'te DOHC (Double Overhead Camshaft) supap sisteminin kam milleri ve kam milleri üzerinde bulunan kamlar gösterilmiştir.



Şekil 3.13. DOHC supap sistemi

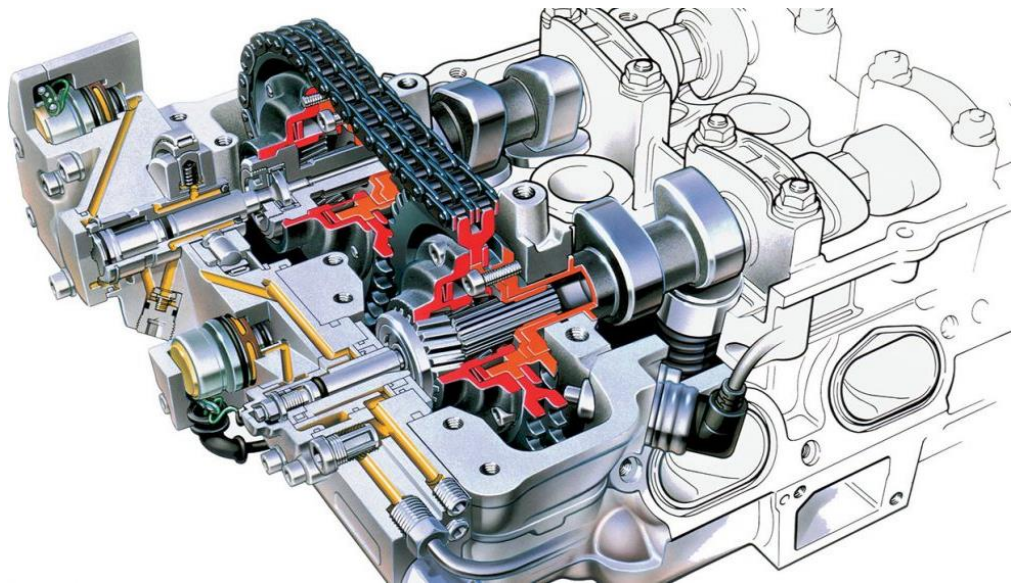
3.6.1.1. Kam fazını kaydıran sistemler

Kam fazının kaydırıldığı sistemlerde supabın açık kaldığı süre ile supabın yüksekliği değişmemektedir. Sabit supap zamanlamasına sahip bir motorda kam mili ile krank mili birbirine mekanik olarak bağlı olduğu için zamanlama açısı değiştirilemez. Kam fazını kaydıran sistemlerde ise oluşan kam mili açısı farkıyla, kam milinin konumu değiştirilerek supap zamanlaması değiştirilebilir. Kam fazının kaydırıldığı sistemlerde kam milinin pozisyonu değiştirilerek supabın erken veya geç açılması sağlanır. Bu mekanizmalar motor devrine göre değişerek, silindir içine alınan karışımın optimum seviyede olmasını sağlar. Kamlar motorun çalışma devrine göre kam mili üzerinde sağa veya sola motor boyutlarına göre 4-7 mm kadar motor ECU tarafından pimi devreye sokarak kamı kaydırabilmektedir. Her emme supabı için motorun tam yüklerde ve kısmi yüklerde çalışmasını sağlayacak şekilde yan yana biri büyük diğeri küçük iki kam bulunmaktadır. Kam fazını kaydıran sistemler diğer kam miline bağımlı sistemlere göre daha ucuz ve basit yapıdadır. Bu sistemler ilk başta sadece emme kam mili üzerinde uygulansa da daha sonra egzoz kam mili üzerinde de uygulanarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Emme fazının kaydırılması Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Emme fazının kaydırıldığı sistemler

Kam fazının kaydırıldığı sistemlere BMW'nin kullandığı VANOS sistemi örnek olarak verilebilir. VANOS'un açılımı Variable Nockenwellen Steuerung'dur ve değişken kam mili zamanlaması anlamına gelmektedir. BMW VANOS sistemi ilk kez 1992 yılında kullanılmıştır. VANOS sistemi ilk kullanılmaya başladığı yıllarda motorların sadece emme supaplarında uygulanırken daha sonra egzoz supaplarında da uygulanmaya başlanmış ve bu sisteme Double VANOS ismi verilmiştir. Şekil 3.15'te BMW Double VANOS sistemi gösterilmiştir.

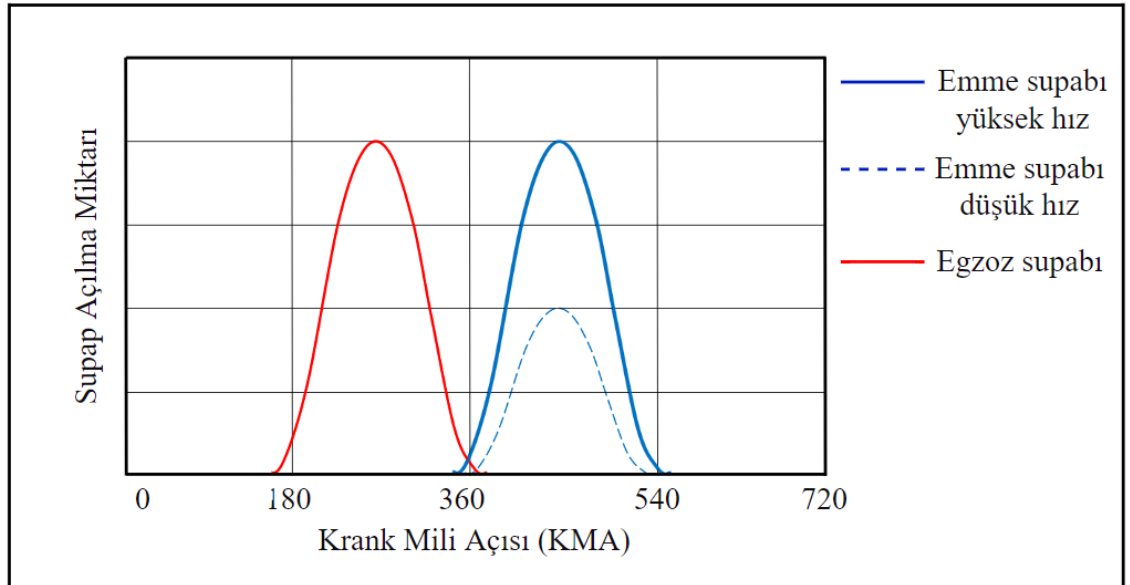


Şekil 3.15. BMW Double Vanos sistemi (BMW, 2005)

VANOS sisteminde, solenoid valf ve hidrolik ayar ünitesi bulunmaktadır. Hidrolik ayar ünitesinin içerisinde ise bir helis dişli bulunmaktadır. ECU tarafından krank mili konum sensöründen gelen sinyale göre VANOS solenoidi yağ akışını ayarlayarak helisel dişlisini hareket ettirir. Helisel dişlisinin hareketine göre kamların açısı değişerek emme supabı erken veya geç açılır. VANOS sisteminde emme kamının fazı en fazla 60° KMA olurken egzoz kamının fazı en fazla 40° KMA kaymaktadır (Birgül, 2014).

3.6.1.2. Supap yüksekliğini değiştiren sistemler

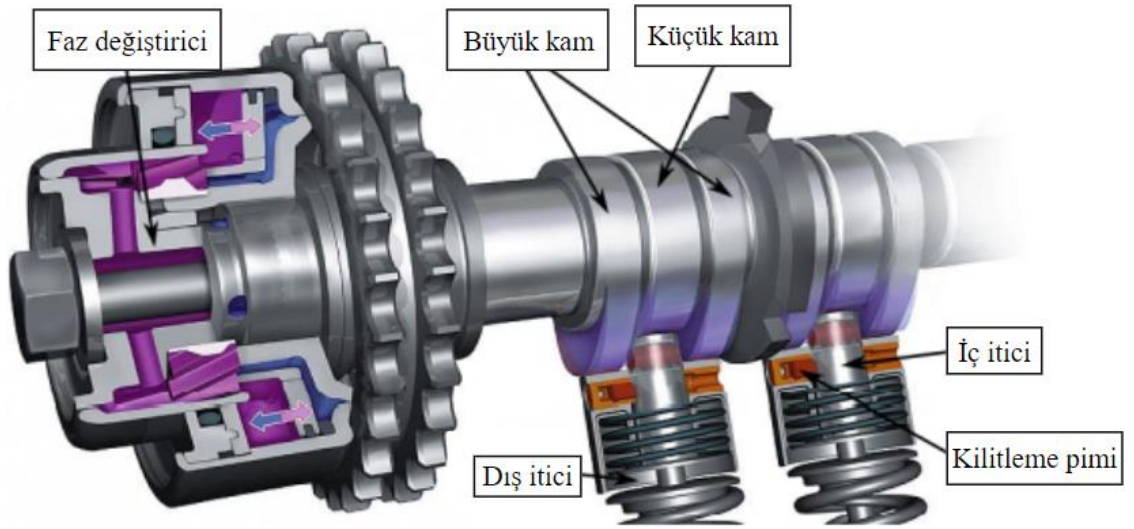
Supap yüksekliğinin değişmesi motor performansını etkileyen bir diğer unsurdur. VVL (Variable Valve Lift) sistemleri yani supap yüksekliğinin değiştiği sistemlerde tek bir supap için birden fazla kam kullanılır. Değişken supap açılma sistemlerinde yüksek, orta ve düşük devirlerde supap yüksekliği değiştirilerek motorun performansı, yakıt tüketimi ve emisyon değerleri gibi parametrelerde iyileştirmeler sağlanır. Yüksek motor devirlerinde silindir içine hava-yakıt karışımının alınması için kısıtlı süre vardır. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla yüksek devirlerde supap açılma miktarı artırılır. Düşük devirlerde ise türbülans nedeniyle supap açılma miktarının az olması istenir. Bu sistemler kam fazının kaydırıldığı sistemlere göre daha pahalı ve karmaşıktır. Şekil 3.16'da emme zamanında farklı kam profilleri sayesinde supap yüksekliğinin ve supap zamanlamasının değiştiği görülmektedir.



Şekil 3.16. Farklı kam profillerinin emme supabına uygulanması

Temel prensipleri yaklaşık olarak aynı olmakla beraber farklı firmalar supap yüksekliğini değiştiren uygulamalar yapmıştır. Bu farklı uygulamalara, Porsche VarioCam Plus ve Honda VTEC sistemleri örnek verilebilir.

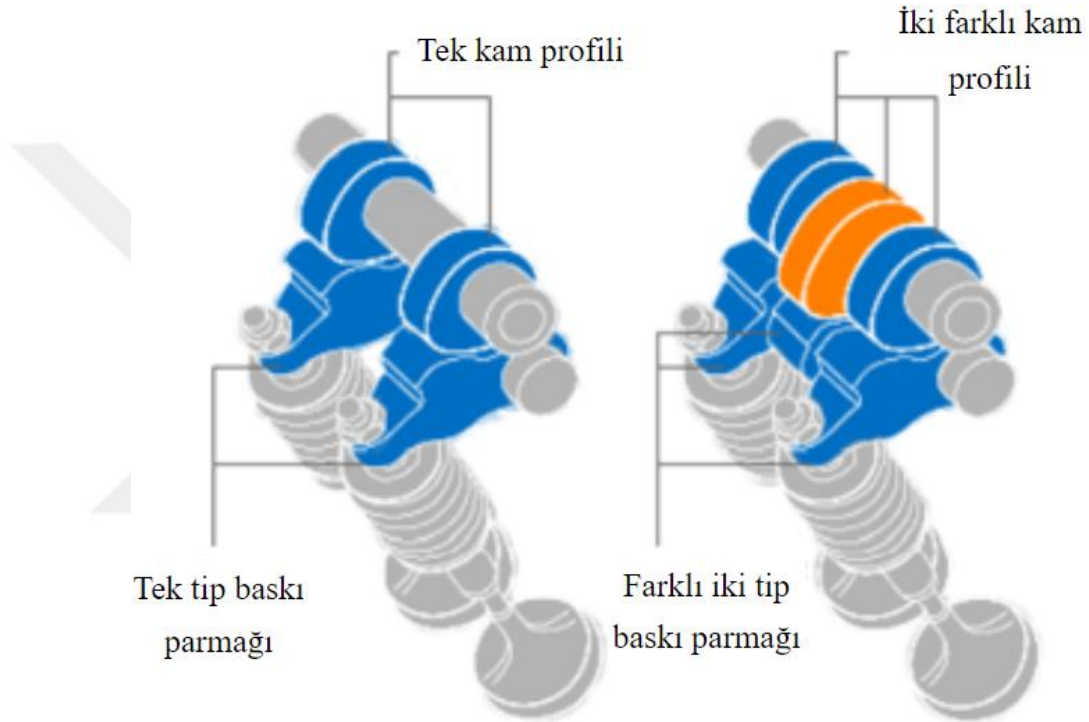
Porsche tarafından VarioCam 1968-1991 yılları arasında kullanılan değişken supap zamanlaması sistemidir. Bu sistem kam milinin faz açısını değiştirmek için zamanlama zinciri kullanmıştır. Daha sonra bu sistem geliştirilerek, zamanlama zinciri yerine hidrolik kam fazı kullanılarak VarioCam Plus sistemi geliştirilmiştir. Porsche VarioCam Plus sistemi supap zamanlamasını ve supap açık kalma süresinin yanında supapların açılma miktarını da değiştirir. Bu sistemde her supap için üç farklı kam profili kullanılır. Sağ ve solda büyük kam profili kullanırken, büyük kamların arasında bir adet küçük kam profili kullanılmaktadır. VarioCam Plus sisteminde bir pim ve iki hidrolik iticiden oluşmaktadır. Pim, ağır yüklerde hidrolik iticileri birbirine bağlayarak büyük kam profilleri kullanılırken, düşük yüklerde iticiler birbirinden bağımsızdır ve küçük kam profili kullanılmaktadır. Küçük kam profili sayesinde supap 3 mm açılırken, yüksek kam profilinde supap 10 mm açılmaktadır. Şekil 3.17’de Porsche VarioCam Plus sistemi gösterilmiştir (Birgül, 2014; Duchaud, 2015).



Şekil 3.17. Porsche VarioCam Plus sistemi (Duchaud, 2015)

Honda VTEC (Variable Valve Timing and Lift Electronic Control) sistemi supap zamanlamasını ve supabın ne kadar açılacağını elektronik olarak belirleyen bir sistemdir. Bu sistem, kam mili üzerinde iki adet düşük hız kamı ile bir adet yüksek hız kamından

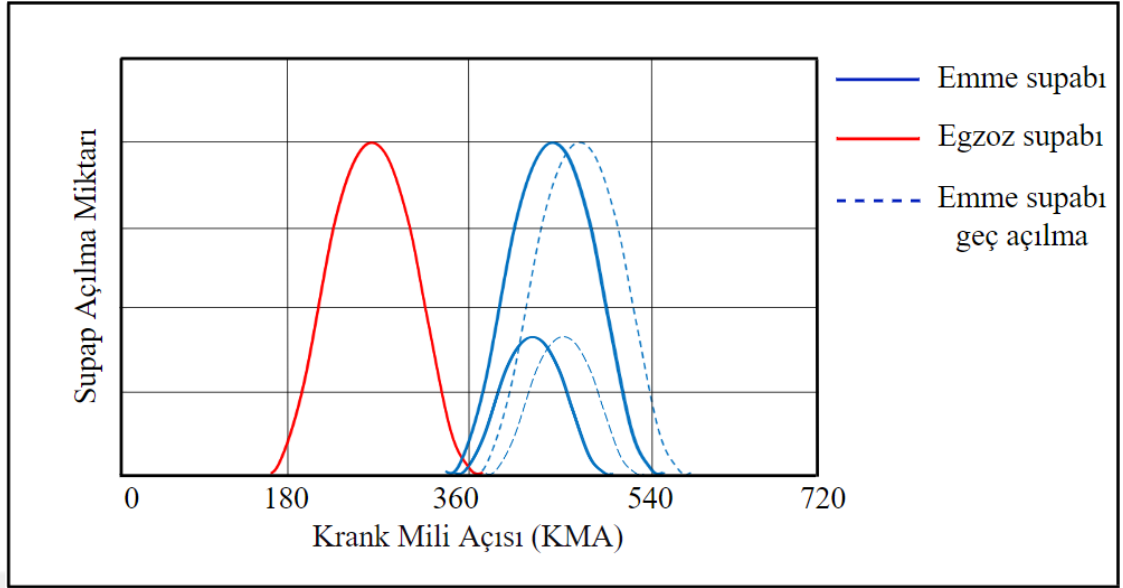
meydana gelmektedir. Elektronik Kontrol Ünitesi vasıtasıyla farklı devirlerde farklı kamları devreye sokarak supap zamanlamasını ve farklı kam yüksekliklerini ayarlamaktadır. Düşük devirlerde küçük kam profilleri kullanılırken yüksek devirlerde supapların daha fazla açılmasını sağlayan büyük kam profili kullanılmaktadır. Düşük devirlerde kamlar birbirinden bağımsız çalışırken yüksek devirlerde bir pim aracılığıyla küçük ve büyük kamlar birlikte hareket etmektedir. Şekil 3.18’de Honda VTEC sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Honda VTEC sistemi (Duchaud, 2015)

3.6.1.3. Kam fazını kaydıran ve supap yüksekliğini değiştiren sistemler

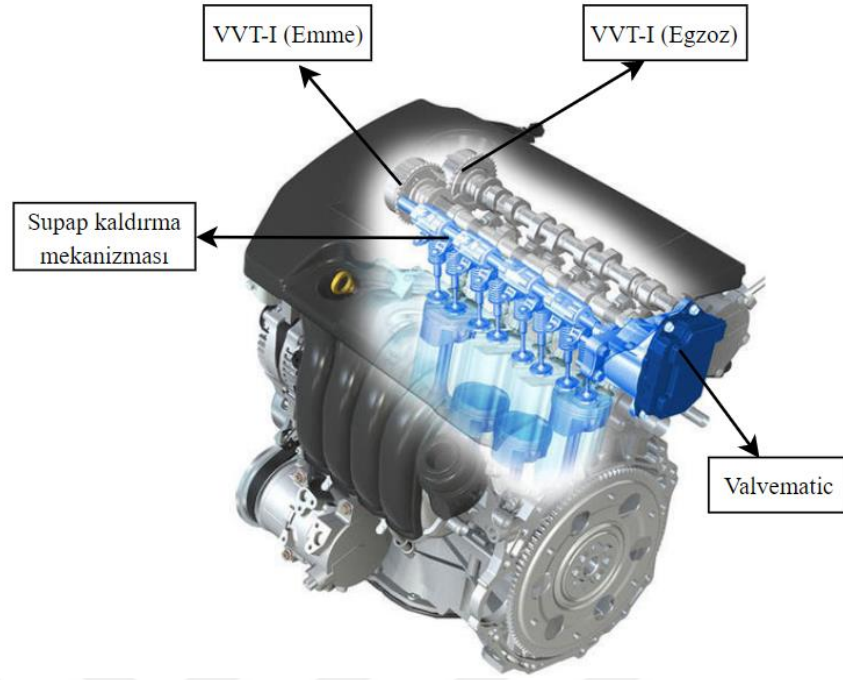
Kam fazının kayması ile supap zamanlamasını, kam fazının değişmesi ile de supap açılma miktarını değiştiren bu kompleks sistemler aynı zamanda supap zaman süresini de ayarlamaktadır. Bu sistem motorun performansında, yakıt tüketiminde ve egzoz emisyon gibi parametrelerde önemli iyileştirmeler meydana getirmiştir. Sadece kam fazını kaydıran ve sadece supap açılma miktarını ayarlayabilen sistemlere göre daha karmaşık ve maliyetlidir. Şekil 3.19’da emme zamanında kam fazının kaydırılması ve farklı supap açılma miktarlarına sahip sistemlerin grafiği verilmiştir.



Şekil 3.19. Kam fazının kaydırılması ve farklı supap açılma miktarı

Toyota VVTL-I (Variable Valve Timing and Lift Intelligent System) sistemi, VVT-I (Variable Valve Timing with intelligence) sisteminin gelişmiş halidir. VVTL-I sistemi düşük hızlarda daha fazla momentum ve yüksek hızlarda daha fazla güç edilmek amacıyla tasarlanmıştır. VVTL-I sistemi VVT-I sistemi gibi kam milinin açısını değiştirerek supapların açılma ve kapanma zamanını değiştirmenin yanında supapların açılma miktarı ile supapların açılma süresini de değiştirir. VVTL-I sistemi iki kademeli değişken supap açma aralığına sahiptir. Diğer sistemler gibi VVTL-I sisteminde de kam mili üzerinde yüksek hız ve düşük hız kam profilleri bulunmaktadır. Kam profilleri arasında geçişi sağlamak için kilitleme pimi kullanılmaktadır. Bu pim hidrolik yağ basıncı ile çalışmaktadır. Düşük devirlerde düşük hız kam profili etkinken, yüksek devirlerde yüksek hız kam profili etkindir.

Toyota'nın geliştirdiği bir diğer sistemde değişken supap yüksekliğine imkân sağlayan Valvematic sistemidir. VVTL-I sistemi iki kademedeki supapları açma imkânına sahipken, Valvematic sistemi sürekli değişken olarak supapları açabilmektedir. Değişken supap zamanlaması benzin ve dizel motorlarında temelde aynı çalışma prensibi ile fakat çeşitli isimlerle tanımlanabilir. Günümüzde Toyota firmasının ürettiği bazı araçlarda Valvematic sistemi ile birlikte emme ve egzoz supaplarının zamanlamalarını değiştirebilen Dual VVT-I sistemi birlikte kullanılmaktadır. Şekil 3.20'de Toyota Valvematic sistemi verilmiştir.



Şekil 3.20. Toyota Valvematic sistemi

3.7. Kam Milinden Bağımsız Değişken Supap Sistemleri

Kam milinden bağımsız supap sistemlerinin temel amacı, kam miline bağımlı değişken supap mekanizmalarındaki kam mili ve kam profili tarafından kaynaklanan kısıtlamalar ile kayıpların önlenmesi sağlamaktır. emme ve egzoz supaplarının tam değişken şekilde çalışmasını kontrol etmektir. Kam milinden bağımsız sistemlerde, kam milinden vazgeçilerek, sürtünme kayıpları önlenmiş ve tamamen elektrik kontrollü yöntemlerle emme ve egzoz supaplarının açılıp kapanması sağlanmıştır. Kam milinden bağımsız değişken supap sistemleri günümüzde elektrohidrolik, elektropnömatik ve elektromekanik supap sistemleri olmak üzere üç farklı tipte sınıflandırılır.

Elektrohidrolik supap sistemleri ile elektropnömatik supap sistemleri, elektromekanik supap sistemleri üzerinde içten yanmalı motorlarda birçok çalışma yapılmaktadır. Elektrohidrolik supap sistemleri, basınçlı akışkanın elektronik bir kontrol valfi yardımı ile supapları açıp-kapatır sistemlerdir. Elektropnömatik supap sistemlerinin çalışma prensibi elektrohidrolik supap sistemlerine çok benzemektedir. Elektrohidrolik sistemlerde basınçlı sıvı kullanılırken, elektropnömatik sistemlerde basınçlı hava kullanılmaktadır (Taşlıyol, 2011).

3.7.1. Elektromekanik supap sistemleri

Elektromekanik supap (EMS) sistemleri, basit olarak bobinin ürettiği manyetik alan sayesinde supapların açılıp kapanmasını sağlar. Elektromekanik supap sistemleri diğer kam milinden bağımsız sistemlere göre daha basit yapıdadır. Bu tezde tasarlanan elektromekanik supap sisteminde bir adet bobin devresi, iki adet yay, bir adet nüve ve bir adet supaptan oluşmaktadır.

Elektromekanik supap sistemleri, solenoid vasıtasıyla nüvenin lineer hareketi ile supabın açılıp kapanmasını sağlar. Supaplar açılıp kapanırken sadece solenoidin ürettiği enerjiden değil aynı zamanda EMS sisteminde bulunan yaylardan da faydalanılır. Solenoid bobin elektrikleştirildiğinde oluşan manyetik kuvvet, nüveyi hareket ettirerek supabın açılmasını sağlarken, solenoid bobinin elektrikleşmesi kesildiğinde ise yay kuvvetinden faydalanılarak nüvenin tekrar eski konumuna dönmesi yani supabın kapanması sağlanır.

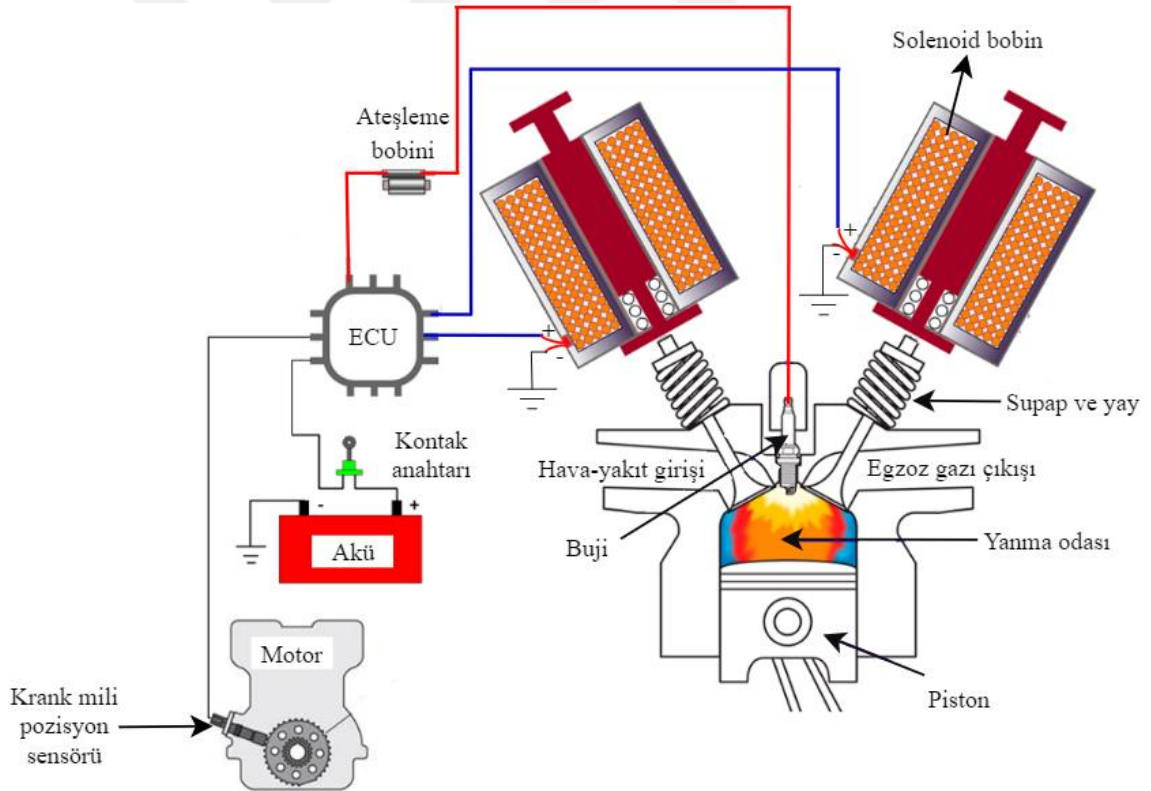
Elektromekanik supap sisteminde enerji yokken yaylar supabı kapalı konumda tutmaktadır. Supabın hareketi için kullanılan yayın sert olması, daha fazla güç gerektirecek, yayın yumuşak olması ise istenilen geri tepmenin sağlanamamasına neden olacaktır. Bu yüzden elektromekanik supap sistemi için yay seçiminin kritik bir önemi vardır.

EMS sisteminde supabın kısa sürede açılıp kapanması, EMS sisteminin tercih edilmesinde rol oynayan faktörlerden birisidir. Supabın oturma yüzeyine olan hızının belirli bir seviyede optimize edilmelidir. Aksi takdirde mekanik aşınma, gürültü veya hızının yüksek olması sebebiyle kapanan supabın kısa bir süreliğine tekrar açılıp kapanması (sekmesi) sistemi olumsuz etkileyecektir (Demir, 2017).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Tasarımı ve Hesaplamaları

Elektromekanik supap sistemleri; supabın zamanlaması, supap yüksekliği ve supabın açık kalma süresinin bir kontrolcü aracılığıyla, krank milindeki sensörlerin gönderdiği sinyaller değerlendirilerek değişken devirler için motorun en uygun şartlarda çalışmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla elektromekanik supap sistemleri motorun düşük, orta ve yüksek devirlerinde supapların durumlarını optimize ederek volumetrik verimin iyileşmesini ve kararlılığını sağlar. Volumetrik verimin iyileşmesi ve kararlılığının sağlanması sonucunda yanma verimliliği, performans artışı ve egzoz emisyon değerleri gibi birçok parametrede iyileştirmeler meydana gelir. Şekil 4.1’de tasarlanan elektromekanik kontrollü supap mekanizmasının şematik resmi verilmiştir.



Şekil 4.1. Elektromekanik kontrollü supap mekanizması

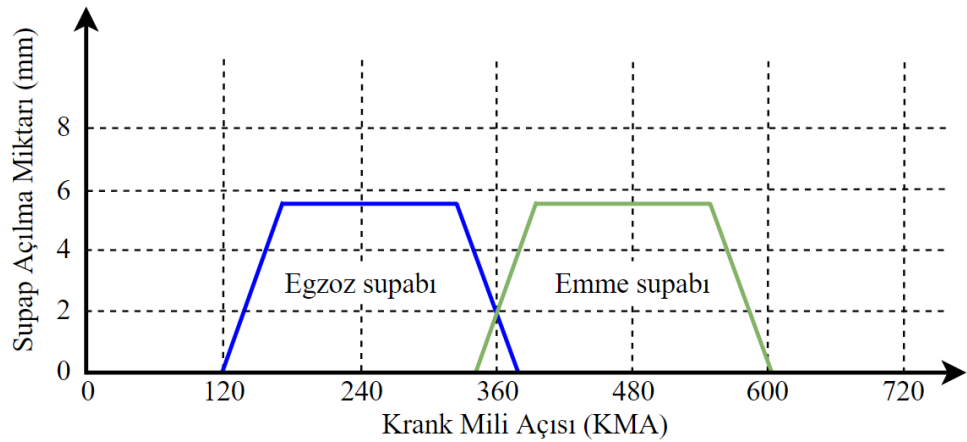
Bu tezde ele alınan elektromekanik kontrollü supap mekanizmasının tasarımı ve simülasyonu KAMA KG 390 dört zamanlı, tek silindirli motor referans alınarak yapılacaktır. Elektromekanik supap sisteminin çalışma şartları egzoz supabına göre

yapılmakla beraber supap açılma miktarları emme ve egzoz supabı için yaklaşık 5,5-6 mm olarak belirlenmiştir. KAMA KG 390 motorun özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. KAMA KG 390 motorunun özellikleri

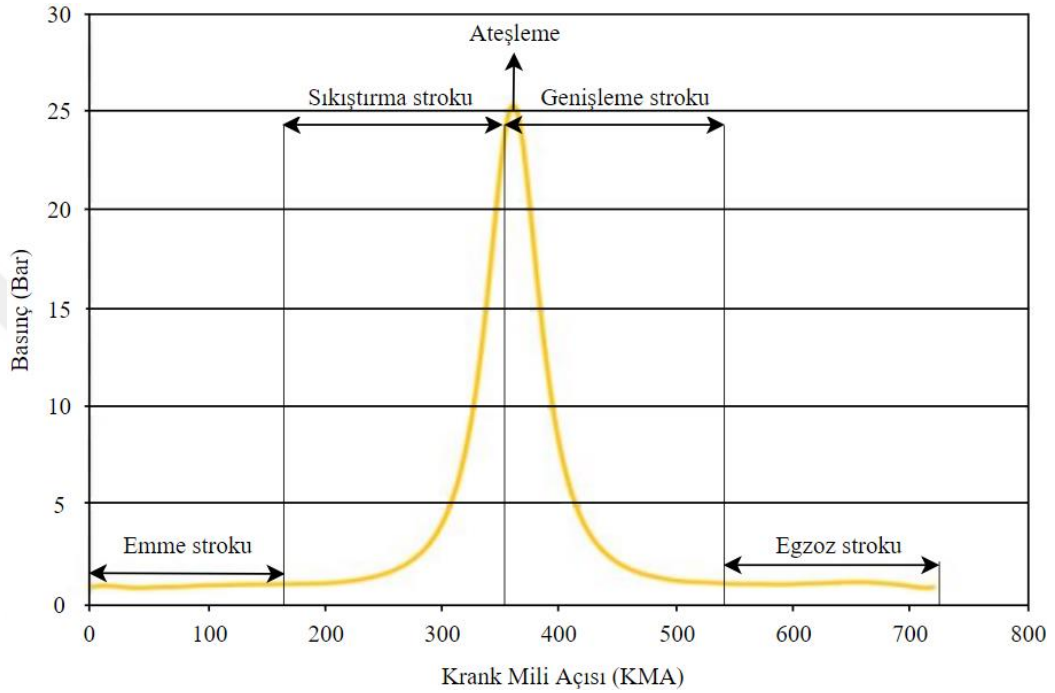
Maksimum Güç (hp)	13
Çap x Strok (mm)	88x64
Silindir hacmi (cc)	398
Maksimum devir (dev/dk)	3600
Çalışma şekli	İpli sistem
Motor tipi	4 zamanlı-Tek silindirli-hava soğutmalı OHV benzinli motor
Nominal çıkış gücü (KW)	7,7
Yakıt deposu kapasitesi (Lt)	6,5
Yağ kapasitesi (Lt)	1,1
Yakıt tüketimi (Lt/saat)	2
Yağ tipi	SAE 10w30-15w40
Ağırlık (kg)	35

Elektromekanik supap mekanizmalarında supaplar, bobinin sağladığı manyetik kuvvet ile açılmakta ve supap yaylarının kuvveti ile kapanmaktadır. Yapılan hesaplamalara göre emme ve egzoz supaplarının açılma miktarları sabit tutulup yaklaşık 5,5-6 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.2’de krank mili açısına göre supap açılma miktarı Şekil 3.11 dikkate alınarak verilmiştir.



Şekil 4.2. Krank mili açısına göre supap açılma miktarı

KAMA KG 390 motorunun özelliklerine göre silindir içi basıncı alt ölü noktaya 40° krank mili açısı civarında yaklaşık 3-4 bar aralığındadır. Elektromekanik supap sisteminde egzoz supabı alt ölü noktaya gelmeden açılacaktır, bu sebeple genişleme stroku tamamlanmadan önceki değerler göz önünde bulundurularak işlemler yapılmıştır. Şekil 4.3'te krank mili açısına göre silindir içi basınç değişimi verilmiştir.



Şekil 4.3. Silindir içi basınç değişimi (Cellek vd., 2016)

Supaplar açılırken gerekli yay kuvveti ($F_{yay}=kx$) silindir içi basıncını yenecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu çalışmada manifold basıncı ihmal edilerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır, yapılan hesaplamalara göre silindir içindeki basıncın supap tablasına uyguladığı kuvvet ($F_b=PA_s$) yaklaşık 250 N olarak belirlenmiştir. $F_{yay} > F_b$ olması gerektiği için yay kuvvetinin, yaya zıt yönde olan basınç kuvvetini yenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde supaplar açılmaz. Yay kuvveti emniyet kat sayısı 1,3 kat alınmıştır. Bunun sebebi motorun çalışmasına bağlı olarak zaman içinde yay tansiyonunda meydana gelecek düşme miktarını karşılamak içindir. Yay sabiti (k) 57 N/mm ve manyetik devreye karşı uygulanan yay kuvveti yaklaşık 325-350 N olarak belirlenmiştir. Solenoid bobin, bu kuvvetleri yenecek şekilde boyutlandırılmalıdır.

Elektromekanik supap sistemleri, temelde elektromanyetik sistemi ile kütle-yay sistemi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. EMS sisteminde supaplar, bobinlerin

enerjilendirilmesiyle açılmakta ve yayların enerjisiyle kapanmaktadır. Supabın açılıp-kapanmasında sistemin cevap hızı için yay seçimi önemlidir. Supapların hareket süresi, supabın açık konumdan kapalı konuma ya da kapalı konumdan açık konuma geçtiği süre olarak ifade edilir. Bu durum kütle-yay sisteminin doğal frekansı ile ilgilidir. EMS sisteminde yüksek performans talebinin karşılanması ve supabın cevap süresinin kısa olması istendiği için doğal frekansın yüksek olması gerekir. Doğal frekansın artışı, yay sabitinin (k) artması veya kütle (m) azaltılması ile sağlanabilir. Eş. 4.1'den kütle-yay sisteminin doğal frekansı w_n ;

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1)$$

elde edilir.

Eş. 4.1'de elde edilen doğal frekans (w_n) aynı zamanda Eş. 4.2'ye eşit ve elektromekanik supap sisteminin supap hareket zamanı, harmonik salınım hareketinin yarısına eşit olduğundan Eş. 4.3'ten supap hareket zamanı t_c ;

$$w_n = \frac{2\pi}{T} \quad (4.2)$$

$$t_c = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\sqrt{k/m}} \quad (4.3)$$

elde edilir.

Eş. 4.3'te t_c : supabın hareket zamanını ve T: periyodu ifade etmektedir. EMS sistemi sinüs fonksiyonuna bağlı olarak nüvenin hareket ettiği miktar Eş. 4.4'ten x;

$$x = \frac{x_h}{2} \left(\left(\sin \left(\frac{t}{t_c} - \frac{1}{2} \right) \pi \right) + 1 \right) \quad (4.4)$$

hesaplanır (Kamış, 2005).

Eş. 4.4'te x_h : nüvenin maksimum hareket mesafesini belirtmektedir. Tasarlanan EMS sisteminde x_h : 5,5-6 mm olacak şekilde belirlenmiş olup sistemin kütlesi Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Elektromekanik supap sisteminin kütlesi

Cisim ağırlığı (g)	Kütle (g)
Egzoz supabı	37,36
Egzoz supap yayı	8,29
Egzoz supap tırnağı	2
Egzoz supabı üst tablası	6,17
Nüve	146
Toplam	199,82

Elektromekanik supap sisteminin supabı aşağı ve/veya yukarı hareket ettirmek için gereken süre ideal olarak sistemin mekanik özelliklerine bağlı kalırken, krank mili açısı (θ_c) motorun devri (n) ile supap hareket zamanına bağlıdır ve Eş. 4.5'ten θ_c ;

$$\theta_c = 6nt_c \quad (4.5)$$

hesaplanır (Giglio, 2001; Kamış, 2005).

Elektromekanik supap sisteminde, herhangi bir motor hızında farklı krank açılarında sorunsuz çalışabilmesi için yay sabiti ve hareketli kütle miktarının krank açısına uygun olması gerekmektedir. Tablo 4.3'te Eş. 4.3 ve Eş. 4.5 kullanılarak bir EMS sisteminin 3600 dev/dk'da, yay sabiti 60 N/mm seçilerek farklı krank açılarında (150° , 90° , 60°) supap hareket zamanı ile toplam hareketli kütle maksimum ne kadar olabileceği gösterilmiştir.

Tablo 4.3. Krank açılarına göre maksimum supap hareket zamanı ve kütle miktarı

θ_c (derece)	150°	90°	60°
n (dev/dk)	3600	3600	3600
k (N/mm)	60	60	60
t_c (ms)	6,94	4,16	2,77
m (g)	292,8	105,2	46,65

Tablo 4.3'te görüldüğü üzere, sabit devirde k/m (yay sabiti/kütle) oranı arttıkça supap hareket süresinin kısaldığı görülmektedir. Elektromekanik supap sistemlerinde daha yüksek performans veya cevap süresinin kısalmasını sağlamak için k/m oranı artırılabilir. Tasarımı gerçekleştirilecek olan elektromekanik supap sisteminde, yay sabiti ve kütle

sabit olacağından bu parametrelerin motorun her devrine uygun farklı krank açılarında sisteme sorun çıkarmayacak şekilde optimize edilmesi gerekmektedir (Giglio, 2001; Kamış, 2005).

4.2. Elektromekanik Supap Mekanizmalarında Solenoid Bobin ve Manyetik Alan

Elektromekanik supap mekanizmalarında supapları harekete geçirmek için solenoid bobin kullanılır. Bobin, elektrik enerjisini kinetik enerjiye dönüştürür. Solenoid bobin basit olarak bir tel etrafına dairesel olarak sarılan iletken tel ile oluşturulur ve telin üzerinden akım geçirilmesiyle manyetik alanın oluşmasını sağlar. Solenoid bobinin oluşturduğu manyetik alanı güçlendirmek için bobinin içerisine demir veya çelik gibi malzemelerden yapılmış nüve yerleştirilir (Ali, 2019). Boyutlandırılan solenoid bobinde çelik malzemenin özellikleri kullanılmıştır.

Bobin ile üretilen manyetik alanın miktarı yani manyetik alan şiddeti (H) ile ifade edilir. Manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti doğru orantılıdır. Bobin, elektrik enerjisinin manyetik alan olarak depolanmasını sağlar. Manyetik alanın gücünü arttırmak için kullanılan iletken tel ferromanyetik bir malzemedendir yapılır. Bobin yapısal olarak bir uzunluk (l) ve kesit alanına (A) sahip olup, bobinin sarımlarından (N) geçen akımın (i) solenoid bobin içinde oluşturduğu manyetik kuvvet çizgileri ile manyetik akı yoğunluğu hesaplanır ve birimi Weber/m²'dir. Manyetik akı yoğunluğu (B) Eş. 4.6'dan;

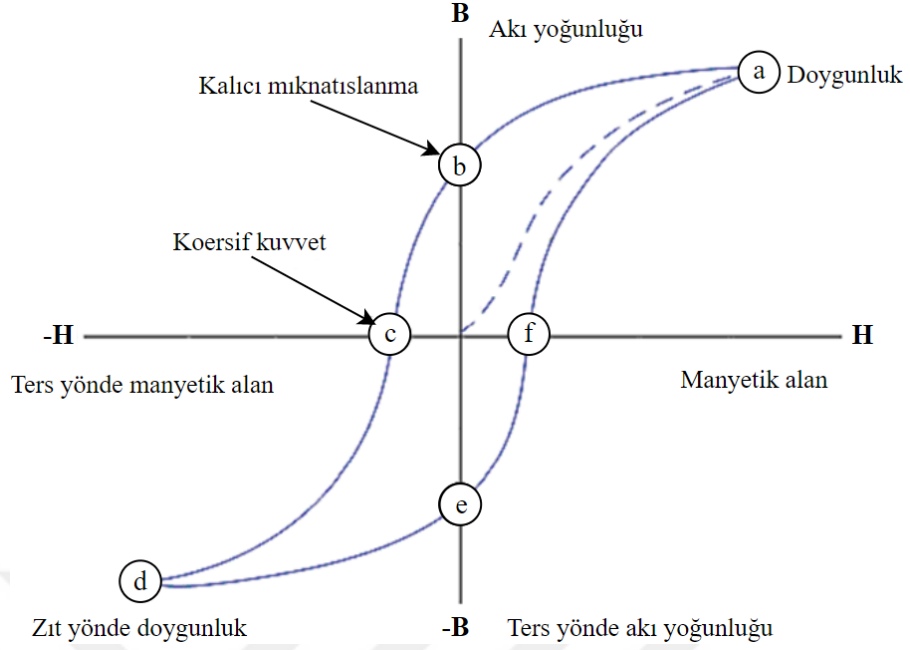
$$B = \mu H = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (4.6)$$

hesaplanır (Sağiroğlu, 2006).

Manyetik geçirgenlik (μ), belirli bir değere sahip olmayıp, havanın ve malzemenin geçirgenliğine göre değişmektedir. Bu değerler B-H eğrilerinden elde edilmekte olup Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Havanın manyetik geçirgenlik değeri bellidir ve $4\pi \times 10^{-7}$ Weber'dir. Manyetik geçirgenlik ifadesi Eş. 4.7'den μ ;

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (4.7)$$

hesaplanır. Burada μ_0 : havanın manyetik geçirgenliğini, μ_r : bağıl geçirgenliği ifade etmektedir.



Şekil 4.4. Ferromanyetik malzemenin B-H grafiği (Chukwuchekwa, 2011)

Bir ferromanyetik malzemenin B-H grafiği; manyetik alan şiddeti değişirken manyetik akı yoğunluğunun ölçülmesiyle elde edilir. Daha önce hiç mıknatıslanmamış veya tamamen demanyetize edilmiş ferromanyetik malzemede akım ile manyetik alan şiddeti lineer artarken, manyetik akı yoğunluğu lineer olarak artmaz. Bu durum Şekil 4.4'te kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Kesikli çizgilerle gösterilen eğri ilk mıknatıslanma eğrisi olarak referans alınır. (a) noktasında ferromanyetik malzeme manyetik doğunluğa ulaşmıştır. Manyetik alan şiddeti sıfır noktasına indirildiğinde malzemede halen manyetik akı kaldığı (b) noktasında görülmektedir. Bu olay mıknatıslanmadan kaynaklanan manyetik kalıcılık durumu olarak bilinir ve B_r ile ifade edilmektedir. Kalıcı manyetikliği yok etmek için manyetik malzemeye ters manyetik alan uygulanır. Bu akının sıfıra indirildiği zorlayıcı (c) noktası olarak bilinir. Bu kısımda uygulanan ters kuvvete koersif kuvvet (H_c) denir. Zıt yönde artan H ile H_c yani manyetik alan şiddeti ile koersif alan şiddeti birbirine eşit olduğu zaman manyetik akı yoğunluğu sıfırlanmış olur. Manyetik alan şiddeti ters yönde artarak (d) noktasında tekrar manyetik olarak doğun duruma gelecektir. Manyetik alan şiddetini tekrar sıfıra düşürmek ve eşit bir kalıcılığa sahip olmak için (e) noktasına getirilir. Manyetik alan şiddetini pozitif yönde tekrar uygulayarak manyetik akı sıfırlanır ve (f) noktasında B-H döngüsü tamamlanır. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddetindeki değişime ayak uyduramaz ve gerisinde kalır. Manyetik malzemelerdeki bu duruma histerezis olayı

denir ve sistemde ısı kaybı olarak ortaya çıkar. Manyetik malzemelerde oluşan bir başka kayıp ise girdap akımları kaybıdır. Girdap akımı kayıpları ferromanyetik malzemeye akımın verilip kesilmesiyle manyetik alanın değişmesi sonucunda meydana gelen ısı kayıplarıdır (Chukwuchekwa, 2011; Sağıroğlu, 2006).

Endüktans, enerjiyi manyetik olarak depolama yeteneği olarak ifade edilebilir. Devrenin fiziksel düzeneğini ve manyetik özelliğini gösteren bir büyüklüktür ve L ile gösterilir, birimi Henry'dir. Eş. 4.8'den L;

$$L = N^2 \frac{\mu_0 A}{l} \quad (4.8)$$

hesaplanır.

Endüktans, elektrik devresindeki manyetik direnç (R_m) şeklinde düzenlenirse Eş. 4.9'dan L;

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (4.9)$$

elde edilir (Sağıroğlu, 2006).

Mekanik enerji ile elektrik enerjisi formüllerini benzeşim yaparak manyetik alanda depolanan enerji ifade edilebilir. Bir mekanik sistemde, sisteme verilen kinetik enerji Eş. 4.10'dan;

$$\int mvdv = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.10)$$

bulunur. Eş. 4.10'da m: kütle v: hızı ifade etmektedir.

Eş. 4.10'daki ifade elektrik formuna göre yazılır ise Eş. 4.11'den;

$$\int LI dI = \frac{1}{2}LI^2 \quad (4.11)$$

elde edilir. Dolayısıyla manyetik alanda depolanan enerji Eş. 4.12'den W_m ;

$$W_m = \frac{1}{2}LI^2 \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilir.

Enerjinin korunumu yasasından faydalanılarak manyetik kuvvet, devrenin endüktansına bağlı olarak Eş. 4.13'ten F_m ;

$$F_m = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (4.13)$$

elde edilir.

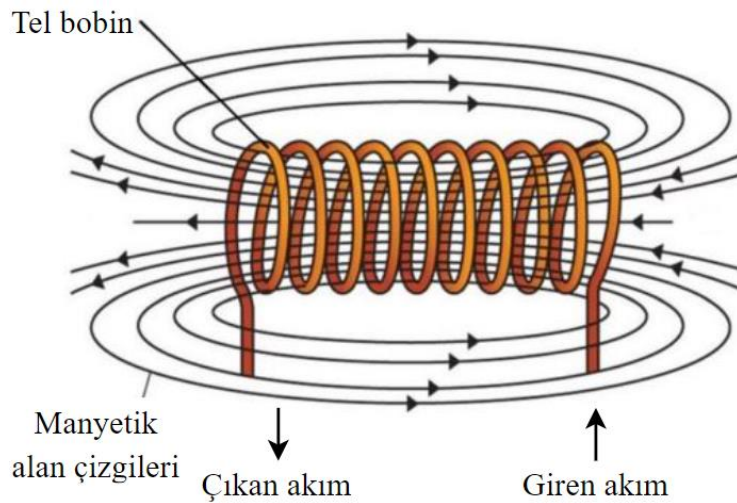
Bobini oluşturan iletken den geçen akım nedeniyle oluşan manyetik akı miktarının (Φ) birimi Weber'dir, manyetik akı yoğunluğu ise kesit alanı ile ters, akı miktarı ile doğru orantılıdır, bobinin bir sarımında oluşan manyetik akı miktarı Eş. 4.14'ten;

$$\Phi = BA \quad (4.14)$$

elde edilir.

Eş. 4.6'daki manyetik akı yoğunluğu denklemi, Eş. 4.14'teki manyetik akı denkleminde yerine yazılırsa, içerisinde nüve bulunmayan, (N) sarım sayısında, (l) uzunluğunda ve (A) kesit alanına sahip bobinin manyetik akı denklemi Eş. 4.15'teki gibi ifade edilir ve bir solenoid bobinin oluşturduğu manyetik alan ve bu alana ait manyetik alan çizgileri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

$$\Phi = \frac{\mu_0 NI}{l} A \quad (4.15)$$



Şekil 4.5. Solenoid bobinde manyetik alan ve çizgileri (Hajforoush vd., 2019)

Bobinin toplam akısı ise Ψ ile gösterilir ve Eş. 4.16'dan Ψ ;

$$\Psi = N\Phi \quad (4.16)$$

hesaplanır. Eş. 4.15'te verilen bir sarımdan geçen akının denklemi Eş. 4.16'da verilen bobinin toplam akısı ifadesinde yerine yazılır ise Eş. 4.17;

$$\Psi = N^2 \frac{\mu_0 A}{l} I \quad (4.17)$$

elde edilir. Sistemde oluşacak manyetik kuvvet ise aşağıdaki Eş. 4.18 ile Eş. 4.19'da F_m ;

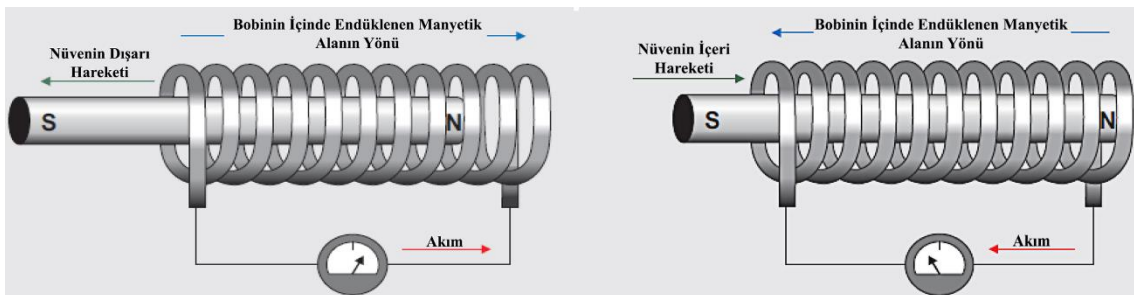
$$F_m = \frac{z B^2 A}{2 \mu_0} \quad (4.18)$$

$$F_m = \frac{z (NI)^2 \mu_0 A}{2 (x)^2} \quad (4.19)$$

olarak ifade edilir. Eş. 4.18 ve Eş. 4.19'da z: hava aralığı sayısı, μ_0 : havanın geçirgenliği, N: sarım sayısı, x: nüvenin bobin içerisinde aldığı mesafeyi ve i: bobinden geçen akımı ifade etmektedir.

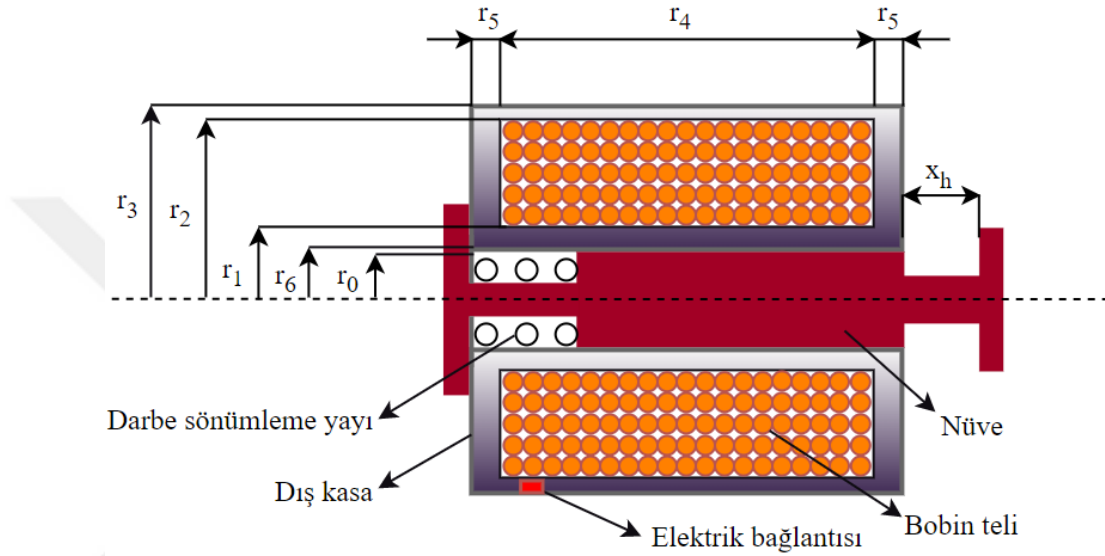
4.2.1. Solenoid bobinin lineer hareketi ve boyutlandırılması

Lineer hareketli solenoid bobin sistemlerinde devreye verilen akım sayesinde oluşan manyetik kuvvet ile nüve solenoidin içinde lineer bir şekilde hareket ettirilmektedir. Supabın açılma anında solenoid bobine verilen akım nüveyi hareket ettirerek supabın açılmasını sağlar. Aynı şekilde supabın kapanma anında ise devredeki akım kesilerek nüvenin yay kuvveti sayesinde ilk konumuna geri dönmesi sağlanmaktadır. Şekil 4.6'da solenoid bobin nüvesinin lineer hareketi gösterilmektedir (Aniket, 2016).



Şekil 4.6. Solenoid bobin nüvesi lineer hareketi

KAMA KG 390 motorunun teknik özellikleri referans alınarak tasarlanacak olan EMS sisteminde supap, solenoid bobinin ürettiği manyetik alan sayesinde lineer hareket edecektir. Bu sistemdeki bobin boyutları gerekli manyetik kuvveti sağlayacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Hareketli eleman (nüve) solenoidin ürettiği manyetik alan sayesinde lineer hareket ederek supabın yaklaşık 5,5-6 mm açılmasını sağlayacaktır. Şekil 4.7’de tasarlanan solenoid bobinin kesiti verilmiştir.



Şekil 4.7. Solenoid bobin kesiti

Manyetik devrede akı dağılımının, uygun bir şekilde sağlanabilmesi için devrenin çok iyi boyutlandırılması gerekmektedir. Bunun için ideal devre boyutları (r_0 , r_1 , r_2 , r_3 , r_4 , r_5 , r_6) Eş. 4.20 ile Eş. 4.21’den faydalanılarak, belirlenmiştir ve Tablo 4.4’te bu değerler verilmiştir (Kamış 2005).

Tablo 4.4. Solenoid bobinin boyutları

Bobinin kısımları	Uzunluk (m)
r_0	10×10^{-3}
r_1	12×10^{-3}
r_2	24×10^{-3}
r_3	26×10^{-3}
r_4	45×10^{-3}
r_5	5×10^{-3}
r_6	11×10^{-3}

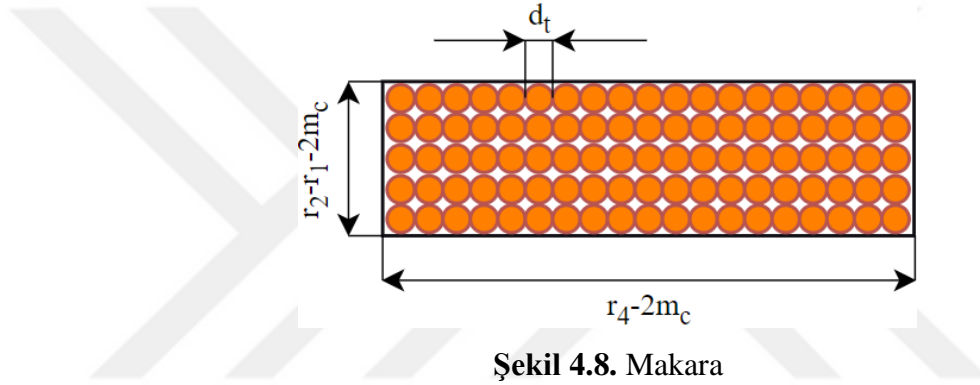
$$3 \leq \frac{r_4}{r_2-r_1} \leq 4 \quad (4.20)$$

$$r_1^2 - r_0^2 = r_3^2 - r_2^2 = 2r_1r_5 \quad (4.21)$$

Manyetik devrede bobinin sarım sayısı Eş. 4.22'den N;

$$N = \frac{f_1(r_4-2m_c)(r_2-r_1-2m_c)}{\left(\frac{\pi(d_t)^2}{4}\right)} \quad (4.22)$$

elde edilir. Burada m_c : cidar kalınlığı, f_1 : boşluk faktörü, d_t : bobinin tel çapını ifade etmektedir ve Şekil 4.8'de makara yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Makara

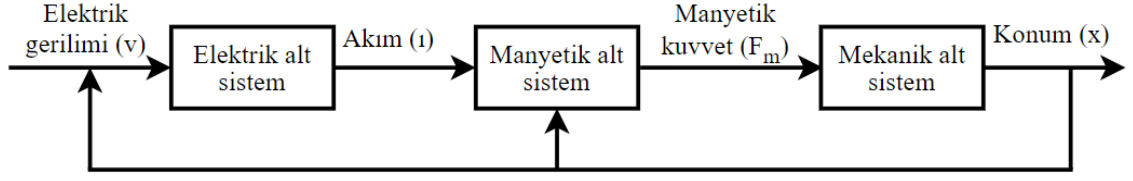
Boyut hesapları yapılan elektromekanik supap sistemi için gerekli solenoid bobin özellikleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Solenoid bobinin özellikleri

İletken çapı	1×10^{-3} m
Sarım sayısı	700
Endüktans	25mH
Direnç	0,87Ω

4.3. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Matematik Modeli

Elektromekanik supap mekanizması üç alt sistemin birbirleriyle bağlantılı olarak supabın açılmasını, kapanmasını ve ne kadar süre açık veya kapalı kalacağını belirler. Bu alt sistemler; elektrik, manyetik ve mekanik olmak üzere üç adettir. Elektromekanik supap sisteminin blok diyagramı Şekil 4.9'da verilmiştir.

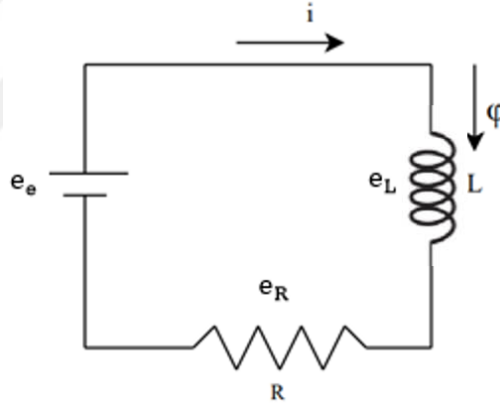


Şekil 4.9. Elektromekanik supap sistemi blok diyagramı

Şekil 4.9’da v : solenoide uygulanan gerilimi, i : bobinden geçen akımı, F_m : elektromanyetik kuvveti ve x : nüvenin konumunu ifade etmektedir.

4.3.1. Elektrik alt sistemi

Elektromekanik supap mekanizmasının elektriksel kısmının esasını teşkil eden bobin, ideal olarak bir direnç ve seri bağlı bir endüktans elemanından meydana gelmektedir. Elektrik alt sistemi Şekil 4.10’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Elektrik alt sistemi

Bobine verilen elektrik gerilimi sayesinde bobinden geçen akımda ve oluşacak manyetik akıda değişime sebebiyet verir. Kirchoff yasasına göre bobindeki sarım sayısı ve manyetik akıya bağlı olarak Eş. 4.23’ten devrenin toplam gerilimi, e_e ;

$$e_e = e_R + e_L = R \cdot i + \frac{d(N\Phi)}{dt} \quad (4.23)$$

elde edilir (Kamış, 2005).

Eş. 4.23’te e_R : bobinin direnç gerilimidir ve Eş. 4.24’teki gibi ifade edilir.

$$e_R = R \cdot i \quad (4.24)$$

e_L ise endüktans elemanındaki gerilim olup zıt elektromotor kuvveti (EMK) olarak isimlendirilmektedir ve $\frac{d(N\Phi)}{dt}$ ifadesine eşittir. Endüktans elemanındaki gerilim manyetik akı bağı cinsinden Eş. 4.25'teki gibi ifade edilir.

$$e_L = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d(N\Phi)}{dt} \quad (4.25)$$

Manyetik akı bağı ($\lambda = N\Phi$), endüktans değişimine göre $\lambda = L(x).i$ şeklinde ifade edilebilir (Bali, 2017). Eş. 4.23'teki ifade;

$$e_e = R.i + L(x)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt} \quad (4.26)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eş. 4.26 düzenlenir ise;

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L(x)} [e_e - R.i - i\frac{dL(x)}{dx}\frac{dx}{dt}] \quad (4.27)$$

elde edilir. Eş. 4.27 endüktansın konuma bağı değeri kullanılarak elde edilmiştir ve bu eşitlikten endüktansın konuma bağı ifadesi Eş. 4.28'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\frac{dL(x)}{dx} = \frac{(r_5).\mu_0\pi(r_5)(2r_0)N^2}{(r_5+x_h)^2(r_6-r_0)} \quad (4.28)$$

Manyetik devrede geçen toplam akı, devredeki manyetik dirence bağıdır. Dolayısıyla manyetik devrenin alanına , uzunluğuna ve manyetik devrenin yapıldığı malzemenin manyetik geçirgenliğine bağıdır. Manyetik direncin birimi H^{-1} dir ve manyetik devreye uygulanan direnç Eş. 4.29'dan R_m ;

$$R_m = \frac{(r_6-r_0)}{\mu_0\pi x_h 2r_0} + \frac{(r_6-r_0)}{\mu_0\pi(r_5)(2r_0)} = \frac{(r_6-r_0)}{\mu_0\pi(r_5)(2r_0)} \left(\frac{r_5+x_h}{x_h} \right) \quad (4.29)$$

elde edilir.

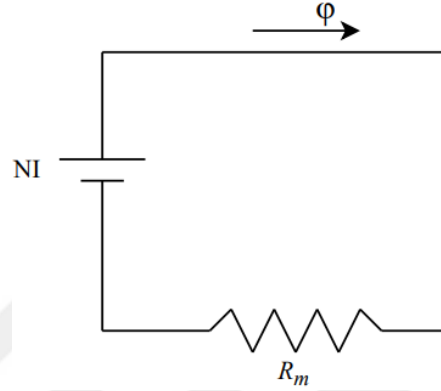
Eşitlik 4.9'dan faydalanılarak endüktans;

$$L(x) = \frac{N^2}{R_m} = \frac{\mu_0\pi(r_5)(2r_0)N^2}{(r_6-r_0)} \left(\frac{x_h}{x_h+r_5} \right) \quad (4.30)$$

şeklinde ifade edilir.

4.3.2. Manyetik alt sistemi

Elektrik devresine uygulanan ohm yasası ($e=IR$), aynı şekilde manyetik devre için de uygulanabilir. Elektrik devresinde akımın akmasını gerilim sağlarken, manyetik devrede akıyı manyetomotor kuvveti ($F_{mmf}=NI$) sağlar (Sağiroğlu, 2006). Şekil 4.11’de elektrik devresine denk manyetik devre şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Manyetik devre

Elektromekanik supap sisteminde, sisteme uygulanan gerilime karşılık manyetik devrenin hareketli eleman üzerine uyguladığı çekim kuvveti Eş. 4.13 yardımıyla hesaplanır. Manyetik sistemde hareketli elemanın (nüve) yer değiştirmesini sağlayan elektromanyetik kuvvet, akıma bağlı olarak Eş. 4.31’deki gibi ifade edilir.

$$F_m = \frac{i^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} = \frac{i^2}{2} \frac{(r_5) \cdot \mu_0 \pi (r_5) (2r_0) N^2}{(r_5 + x_h)^2 (r_6 - r_0)} \quad (4.31)$$

4.3.3. Mekanik alt sistemi

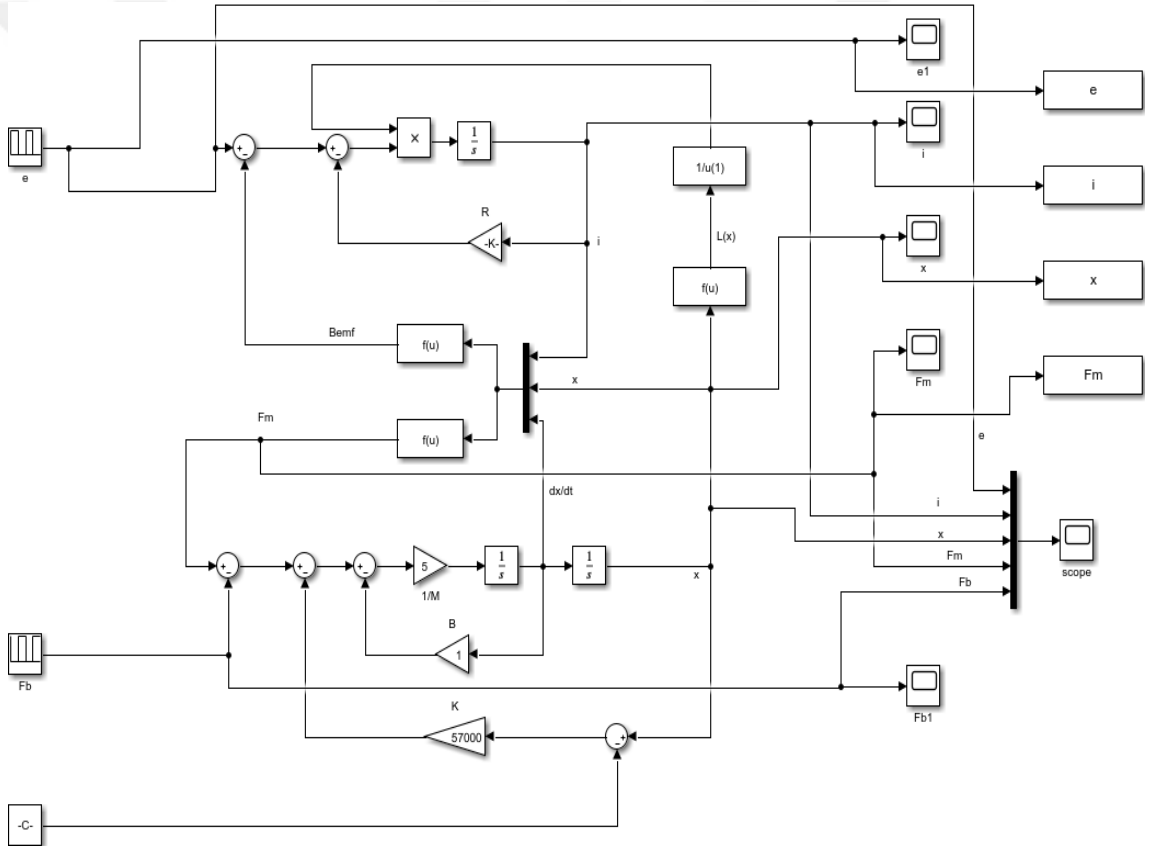
Elektromekanik supap sisteminde, solenoid bobin sistemden çıkartılırsa kütle-yay-damper sistemine benzerdir. Sistemin dinamik denklemi Newton yasasına göre Eş. 4.32’deki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} \Sigma F &= ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}; \\ F_m - k(x - x_0) - b \frac{dx}{dt} - F_b &= m \frac{d^2x}{dt^2}; \\ \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{1}{m} \left(F_m - b \frac{dx}{dt} - k(x - x_0) - F_b \right) \end{aligned} \quad (4.32)$$

Eş. 4.32’de x_0 : Nüvenin ilk baştaki konumunu ve b : sönüm katsayısını ifade etmektedir.

4.4. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Simulink Modeli

Elektromekanik supap mekanizmasının Simulink modeli; Eş. 4.27, Eş. 4.30, Eş. 4.31 ve Eş. 4.32'den faydalanılarak oluşturulmuştur. Sistem elektrik, manyetik ve mekanik kısım olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. MATLAB/Simulink programında oluşturulan modelde, hesaplanan veriler kullanılarak elektromekanik supap sisteminin supabın açılıp kapanması, supabın açılması için gerekli manyetik kuvvet, sistemden geçen akımın davranışları ve sisteme verilen gerilim ile basınç kuvveti gibi parametreler gözlemlenmektedir. Şekil 4.12'de elektromekanik supap mekanizmasının MATLAB/Simulink modeli verilmiştir.



Şekil 4.12. Elektromekanik supap mekanizmasının MATLAB/Simulink modeli

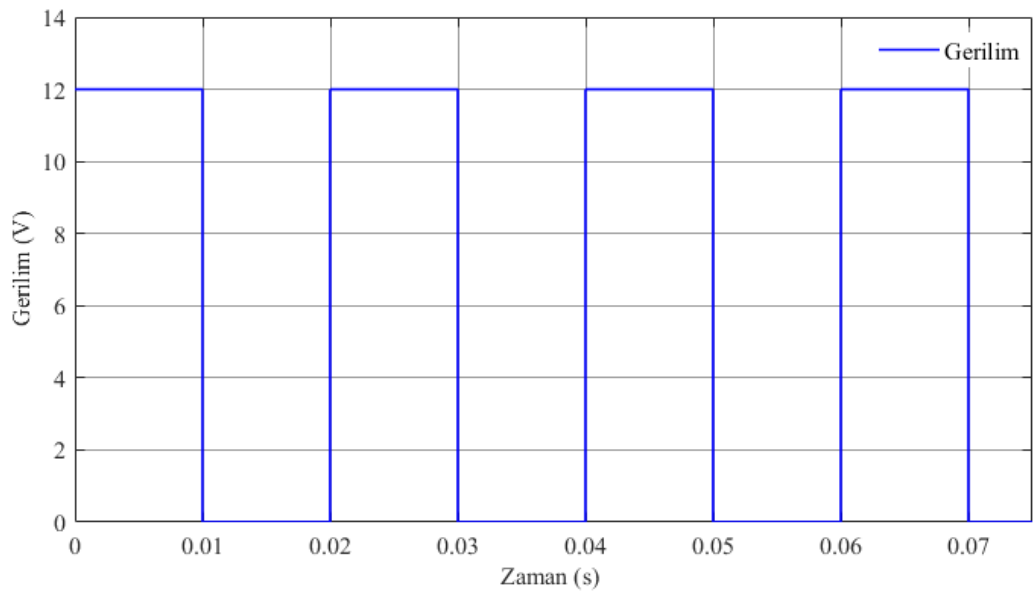
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Giriş

Bu çalışmada KAMA KG 390 motoru referans alınarak egzoz zamanı sonunda silindir içi basınç kuvveti belirlenip, mevcut yay kuvveti ve basınç kuvveti solenoid bobin tarafından üretilen manyetik kuvvet sayesinde yenilerek supabın yaklaşık 5,5-6 mm açılmasını sağlamak amacıyla Elektromekanik supap mekanizmasının model tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. Elektromekanik supap mekanizmasında supabın konumu, sistemden geçen akım, supabın açılması ve kapanması için sisteme verilen 12V'luk kaynağın durumu, supaba etkiyen basınç kuvveti ve supabın açılması için gerekli manyetik kuvvete ait değerler, MATLAB/Simulink'te oluşturulan model ile elde edilmiş ve tartışılmıştır.

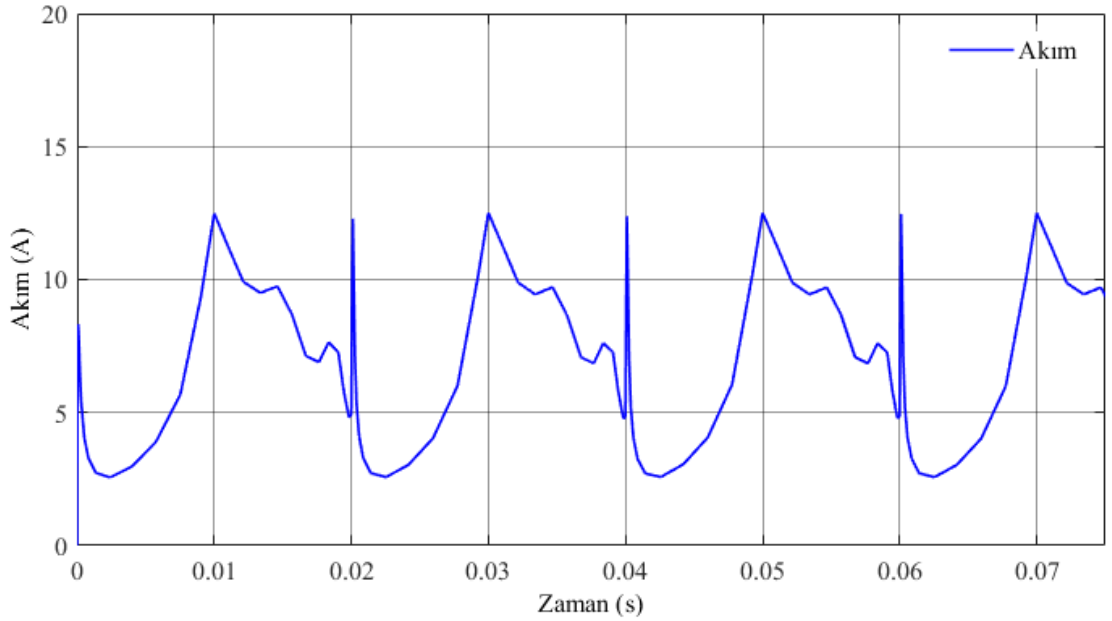
5.2. Elektromekanik Supap Mekanizmasının Simülasyon Sonuçları

Elektromekanik supap mekanizmasının çalışması için araçlarda da uygulanabilirliği olan 12V beslemeli bir sistem kullanılmıştır. Uygulanan gerilim ile supapların açılması sağlanmış, supapların kapanması ise 12V'luk gerilimin sonlandırılmasıyla gerçekleşmiştir. 12V'luk çalışma gerilimine sahip olan sistemin besleme geriliminin zamana bağlı grafiği, Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Elektromekanik supap mekanizmasında gerilimin zamana bağlı değişimi

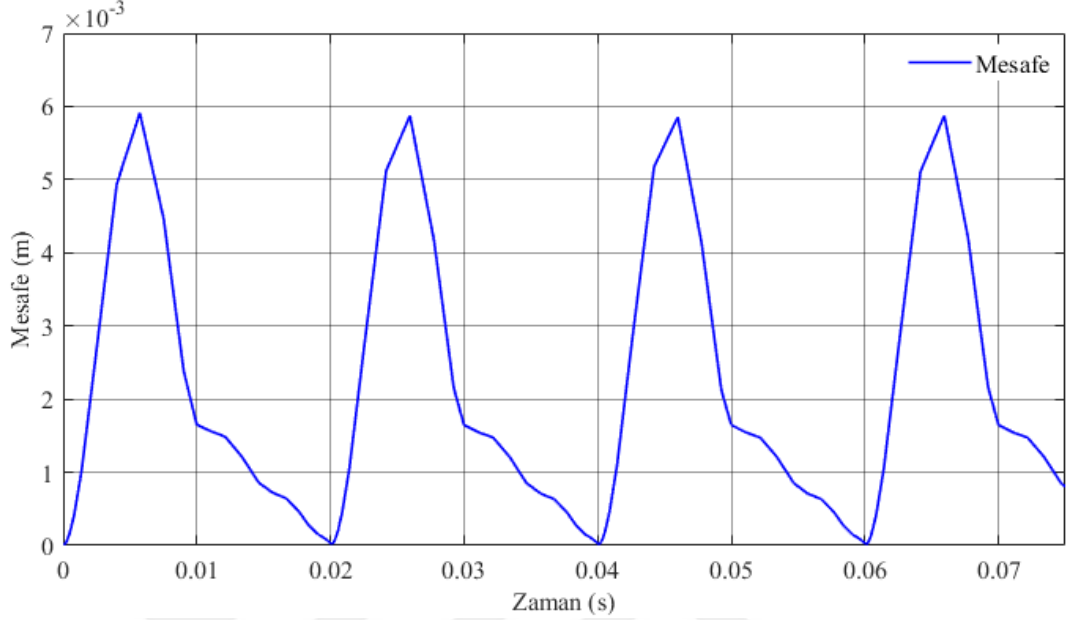
Sisteme verilen gerilimle birlikte elektrik devresinden geçen akım solenoid bobinde manyetik kuvvet oluşturmaktadır. Sistemden ilk başta hiç akım geçmezken, sisteme verilen gerilim sayesinde akım geçmeye başlar. Şekil 5.2’de verilen ve sistemin akım davranışını gösteren grafikte; devredeki endüktansdan dolayı akım belirli bir noktaya kadar sürekli artmaktadır. Bu artış supabın açılması için gerekli manyetik kuvvet oluşana kadar devam etmektedir. Meydana gelen manyetik kuvvet ile supap açıldıktan sonra sisteme verilen gerilim kesildiğinde yay kuvveti ile supap kapama sürecine girer ve akım düşmeye başlar. Aynı grafikte 0-0,02s aralığı incelendiğinde; 0-0,01 saniye aralığında gerilim verildiğinde akım artarken, gerilim kesildiğinde 0,01-0,02 saniye aralığında ise akımın düştüğü gözlemlenmiştir. Bu aralık içerisinde akımdaki dalgalanmanın sebebi ise elektromekanik supap sistemindeki bobin üzerinde kalan artık mıknatısiyetten dolayı sisteme etki eden ters kuvvetten kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.2. Elektromekanik supap mekanizmasının akım davranışı

Elektromekanik supap mekanizmasında supabın hareket mesafesi bir önceki bölümde yaklaşık 5,5-6 mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.3’te supabın açılma mesafesinin zamana bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 5.3’te supabın yaklaşık 5,5-6 mm açıldığı görülmektedir. Supabın açılma süreci, kapanma sürecine kıyasla daha kısa sürmektedir. Bunun nedeni, supap kapanma sürecine girdiğinde yani gerilimin kesildiği anlarda bobinin içinde kalan manyetik alanın düşükte olsa devam etmesidir. Şekil 5.3’te 0,01s anı incelendiğinde

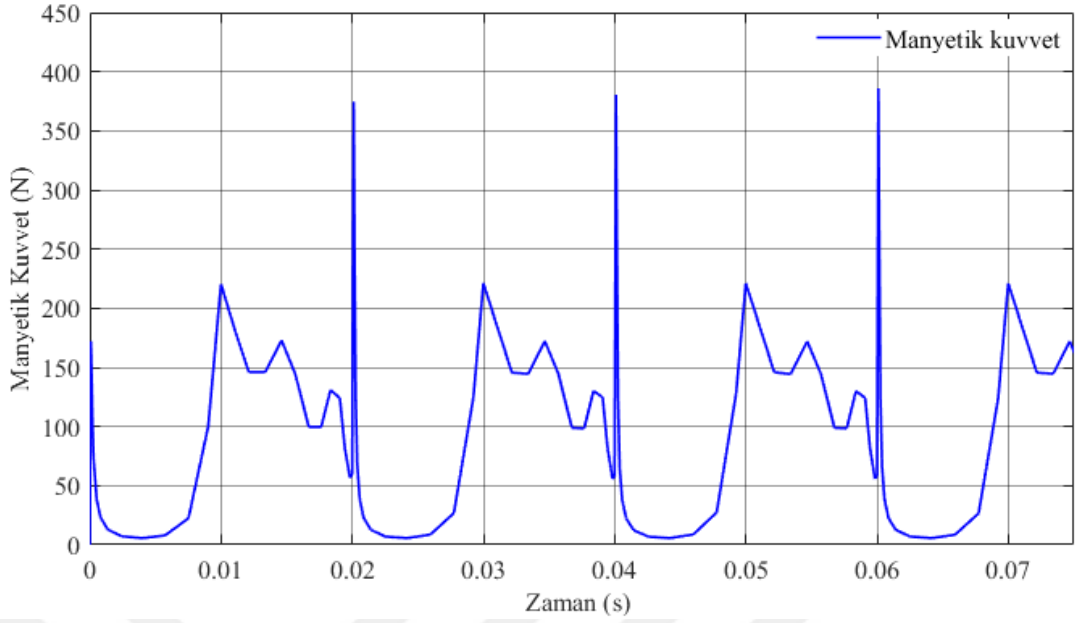
supabın kapanma noktasına yaklaşık 1,7 mm mesafe kaldığında kalıcı mıknatıslanmadan dolayı oluşan negatif kuvvet nedeniyle kapanma sürecinde gecikme oluşmaktadır.



Şekil 5.3. Elektromekanik supap mekanizmasında supabın açılma mesafesi

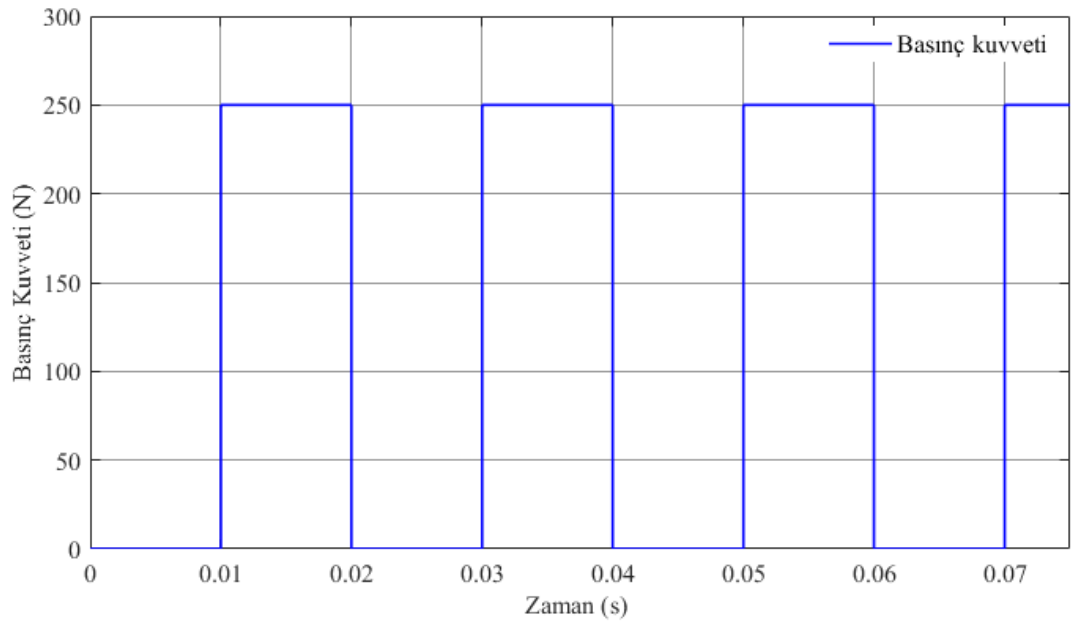
Elektromekanik supap sisteminde supabın açılması manyetik kuvvetle (F_m) sağlanmıştır. Manyetik kuvvet, yanma sürecinin sonunda silindir içinde meydana gelen basınç kuvveti ile sistemin açılıp kapanmasını sağlayan yay kuvvetinin toplamından daha büyük bir değere sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Bölüm 4'te bu değer yaklaşık 350 N olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.4'te verilen manyetik kuvvetin zamana bağlı değişim grafiği incelendiğinde supap açılırken yaklaşık 350-400N'luk bir manyetik kuvvet uygulanmış ve supap açılmaya başladıktan sonra manyetik kuvvetin hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir. Supabın aldığı mesafe arttıkça yani hava aralığı mesafesi arttıkça manyetik kuvvetin düştüğü ve supap kapandığı zaman ise manyetik kuvvetin tamamen sıfırlanmadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni sisteme uygulanan gerilimin kesilmesine yani sistemden akım geçmemesine rağmen sistemin içinde kalan manyetik alanın etkisiyle manyetik kuvvetin sıfırlanmadığıdır.



Şekil 5.4. Elektromekanik supap mekanizmasında supaba etkiyen manyetik kuvvet

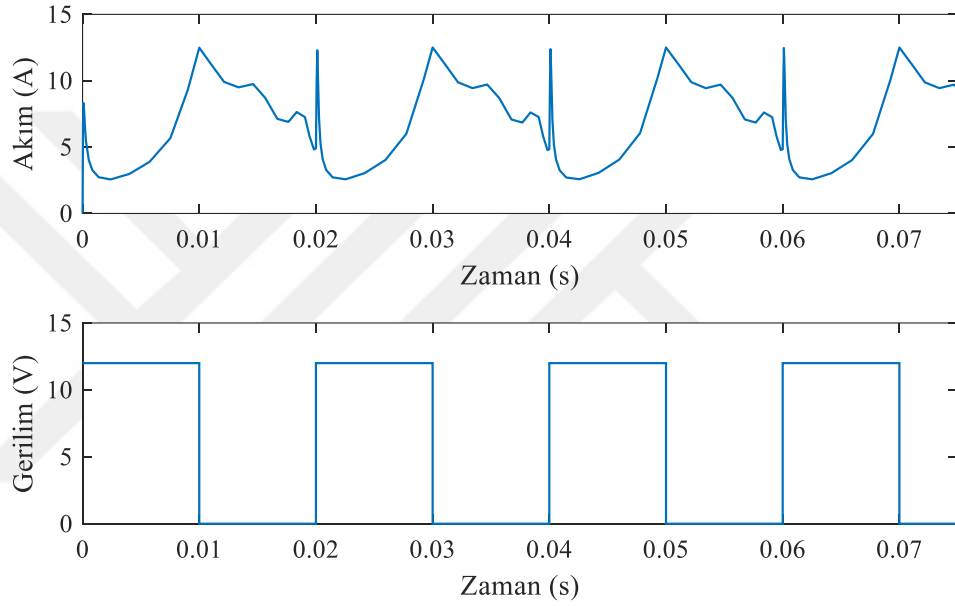
Elektromekanik supap mekanizmasında sisteme verilen basınç kuvveti, genişleme zamanının sonunda yaklaşık 250 N olarak belirlenmiştir. Sisteme gerilim uygulandığında supaplar açılacağı için basınç kuvveti 0 N alınırken, sistemin gerilimi kesildiğinde yani supaplar kapandığında supaba etkiyen basınç kuvveti Şekil 5.5'te görüleceği gibi 250 N olarak verilmiştir.



Şekil 5.5. Elektromekanik supap mekanizmasında supaba etkiyen basınç kuvveti

5.3. Elektromekanik Supap Mekanizmasında Akım ile Gerilim İlişkisi

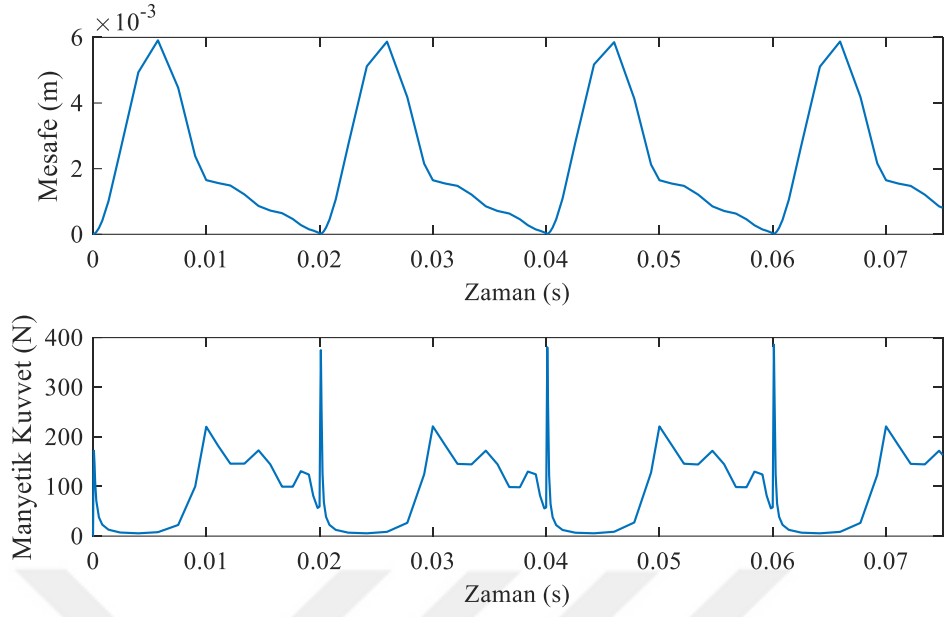
Elektromekanik supap mekanizmasında sisteme verilen gerilim ile birlikte bobinden akım geçmeye başlar. Sisteme verilen 12'Vluk gerilim ile sistemden geçen akımın ilişkisi Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.6'da 0,02s anı incelendiğinde sisteme verilen gerilimle birlikte akım artarken, 0,03s anında gerilimin kesilmesiyle akımın azaldığı görülmektedir. Grafikteki akımın aldığı en küçük değerde supap kapama hareketini tamamlarken, akımın aldığı en yüksek değerde ise supabın açılma hareketine başladığı noktadır.



Şekil 5.6. Elektromekanik supap mekanizmasında akım-gerilim ilişkisi

5.4. Elektromekanik Supap Mekanizmasında Manyetik Kuvvet ile Mesafe İlişkisi

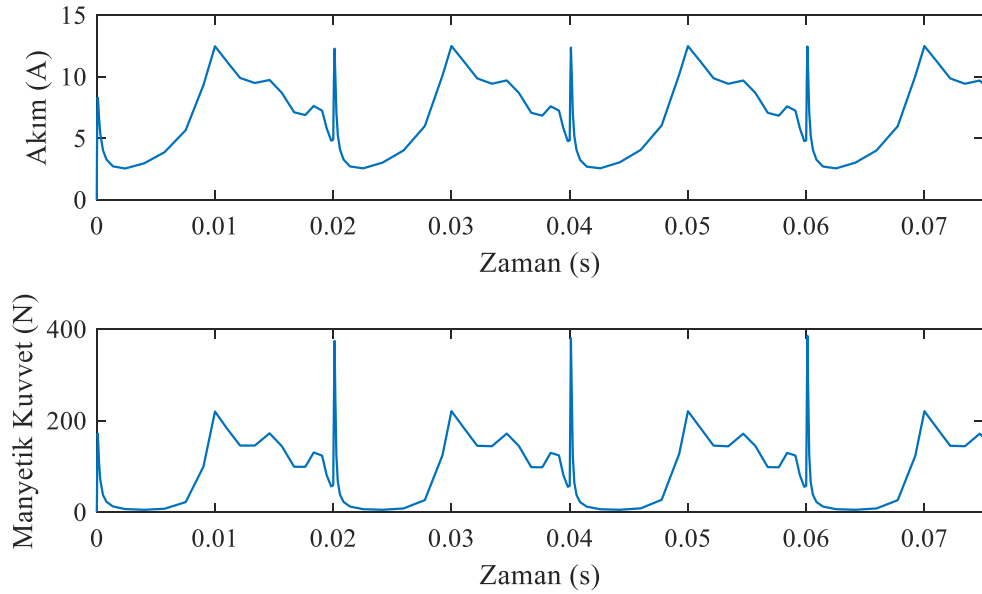
Elektromekanik supap mekanizmasında supabın hareketi, solenoid bobin vasıtasıyla elde edilen manyetik kuvvetle gerçekleşmektedir. Manyetik kuvvet ile supabın konum ilişkisi Şekil 5.7'de verilmiştir. Supabın kapalı konumdan açık konuma geçmesi ve açık konumdan kapalı konuma geçmesi sürecinde zaman farkı vardır. Bunun sebebi supap kapanırken bobindeki manyetik alanın supaba negatif iş yaptırmasıdır. Şekil 5.7'de 0,02s anı incelendiğinde, supabın ilk açılmaya başladığında manyetik kuvvetin yaklaşık 400N'a ulaşırken, supap açıldıktan sonra manyetik kuvvetin yaklaşık 10N'a kadar düştüğü görülmektedir. Manyetik kuvvetin yaklaşık 10 N değerine eriştiği noktada supap yaklaşık 5,5-6 mm açılmıştır. Bu durumda hareket mesafesi arttıkça manyetik kuvvetin azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.7. Elektromekanik supap mekanizmasında manyetik kuvvet-mesafe ilişkisi

5.5. Elektromekanik Supap Mekanizmasında Akım ile Manyetik Kuvvet İlişkisi

Elektromekanik supap mekanizmasında bobinden geçen akım ve oluşan manyetik kuvvet arasındaki ilişki Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekil 5.8 incelendiğinde, sistemden geçen akım ile elde edilen manyetik kuvvet arasında şekilsel benzerlik olduğu görülmektedir. Eş. 4.13’ten bu durum kontrol edilebilir. Manyetik kuvvetin oluşması doğrudan akıma bağlıdır ve aralarında doğru orantı bulunmaktadır.



Şekil 5.8. Elektromekanik supap mekanizmasında akım-manyetik kuvvet ilişkisi

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Bu tez çalışmasında, KAMA KG 390 motor özellikleri referans alınarak elektromekanik supap mekanizması tasarım ve simülasyonu yapılmıştır. MATLAB/Simulink programı kullanılarak elde edilen modelin sonuçları değerlendirilerek, kam milinden bağımsız çalışan supapların yaklaşık 5,5-6 mm açılıp kapanma işlemi simule edilmiştir.

Elektromekanik supap mekanizmasında solenoid bobin aracılığı ile üretilen manyetik kuvvetin, sistemdeki diğer zıt kuvvetleri yenmesi gerekmektedir. Supap kapalı iken solenoid bobinde üretilen manyetik kuvvet yüksek değerde iken supabın açılması ile manyetik kuvvetin düştüğü gözlemlenmiştir.

Elektromekanik supap mekanizmasında supapların açılma süresi ile kapanma süresi arasında, sistemden akım geçmemesine rağmen bobinin içerisinde kalan manyetik alanın supaba negatif kuvvet uygulamasından dolayı farklılıklar görülmüştür. Supapların açılma süresi daha kısa sürede gerçekleşirken kapanma süresinin daha uzun sürdüğü tespit edilmiştir.

Elektromekanik supap mekanizmasında sistemden geçen akım ile solenoid bobinde üretilen manyetik kuvvet grafikleri incelendiğinde çok benzer hareketler görülmüştür. Sistemden geçen akım miktarının maksimum olduğu noktada maksimum manyetik kuvvetin üretildiği, sistemden geçen akım minimum noktaya düştüğünde üretilen manyetik kuvvetinde minimum olduğu gözlemlenmiştir.

Bu simülasyon çalışması, herhangi bir içten yanmalı motorda elektromekanik supap mekanizmasının kullanılması ve kontrolüne dönük yeni projelerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

Bu tür tasarım, modelleme ve simülasyon aşamaları, motor, test ve ölçüm sistemlerine ihtiyaç duymadığından basitliği ve maliyet etkinliği açısından dikkate değer birçok avantaja sahiptir. Ayrıca, simülasyon uygulamaları benzer veya aynı durumlar ve koşullar için döngüsel varyasyonlar veya sapmalar olmaksızın ölçme ve analizleri tekrarlayabilme avantajı sunmaktadır.

6.2. Öneriler

Bu tezde, elektromekanik supap mekanizması modeli ile supapların yaklaşık 5,5-6 mm açılıp kapanması modellenmiştir. Bu modele gelişmiş bir kontrolcü eklenerek farklı motor devirlerine göre supapların erken veya geç açılıp kapanması, supap açılma miktarları ve supap açıklık süresi gibi parametreler optimize edilerek motor performansı, yakıt tüketimi ve egzoz emisyon değerleri gibi birçok parametrede iyileştirmeler yapılabilir.

Bu modelden elden edilen veriler ile birlikte elektronik ya da yazılım ile kontrol edilebilen prototip bir elektromekanik supap mekanizması üretilebilir. Üretilen bu prototip supap mekanizması ile deneysel çalışmalar yapılarak, supap çalışma durumlarına göre volumetrik verim, yakıt tüketimi, enerji kayıpları, motor çıkış değerleri, silindir içi basınç, sıcaklık ve egzoz emisyon değerleri ölçülerek değerlendirilmeler yapılabilir.

Deneysel uygulamalar için; optik bir sensör kullanılarak motor çalışmaz iken dahi pistonun yönü hakkında bilgi alınarak ECU'dan gelen verilere göre silindire hava girişi, yakıt enjeksiyonunu, ateşleme avansı düzenlemesi ve bujide kıvılcım ile yanmayı başlatabilir.

Elektromekanik supap mekanizması modeli, her tür kıvılcım ateşlemeli, sıkıştırma ile ateşlemeli, kıvılcım kontrollü sıkıştırılmalı ateşlemeli (SPCCI) ve homojen şarj sıkıştırılmalı ateşleme (HCCI) gibi düşük emisyonlu motor performansını daha da iyileştirmek için gelişmiş yanma teknolojilerine sahip motorlarda kullanılma imkânı sağlayabilir.

Elektromekanik supap mekanizması, içten yanmalı motorlarda mekanik eksantrik mili sistemini değiştirmeyi amaçlayan çalışmaları içermektedir. İçten yanmalı motorlarda pratik bir sistem için elektromekanik supap mekanizması kontrol ünitesi ECU içinde yapılandırılarak hava, yakıt, hava-yakıt karışımı ve ateşleme tek bir kontrol ünitesi ile gerçekleştirilebilir.

Özetle, elektromekanik supap mekanizması modeli ile emme ve egzoz supaplarının birbirinden bağımsız olarak açılıp kapanması ile değişkenleri her bir supaba ait bağımsız uygulama yapabilmeyi sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Akbaş, A., Çınar, S. ve Sekmen, Y. (2001) “Buji ile ateşlemeli motorlarda değişken supap zamanlamasının performansa etkileri üzerine deneysel bir araştırma”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 35-38.
- Ali, A. A. (2019) “Design of a model-based control for a bulge test”, Master Thesis, *Institute for Fluid Drives and Systems Rwth Aachen University*, Torino, 12-16.
- Aniket, G., Sinha, N., Sudhakar, D. S. S. and Nakum, K. (2016) “Simulation and Modelling of Solenoid in Switch Gear”, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(6), 114-120.
- Anonim, “İki zamanlı benzinli motorun çalışma prensibi”, www.moto-station.com
Son erişim tarihi: 23.05.2022
- Anonim, “Toyota Valvematic sistemi”, www.motorauthority.com
Son erişim tarihi: 23.05.2022
- Anonim, “DOHC supap sistemi”, www.otomobilteknoloji.blogspot.com
Son erişim tarihi: 23.05.2022
- Aygül, V. (2014) “Tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda elektromekanik supap mekanizması uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-79.
- Bali, E. (2017) “Aç-kapa solenoid valf kumandalı elektropnömatik fren valfinin modellenmesi ve analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa 19-20.
- BMW Service, (2005) Aftersales training-produktinformation VANOS, *BMW AG*, München, 48.
- Birgül, N. (2014) “İçten yanmalı motorlarda kullanılacak bir elektromekanik supap sisteminin tasarımı ve geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 39-53.
- Birgül, N. ve Sekmen, P. (2014) “Bir elektromekanik supap (EMS) sisteminin değişik çalışma aralıklarındaki dinamik performansının araştırılması ve içten yanmalı bir motorun desteklenme limitlerinin belirlenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3), 607-616.
- Cellek, F., Arslan, H. and Yontar, A. A. (2016) “Comparison of cylinder pressure data of a gasoline engine for ideal otto and real cycles”, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 4(10), 72-76.

- Chladny, R. R. (2007) "Modeling and control of automotive gas exchange valve solenoid actuators", PhD Thesis, *Alberta University Mechanical Engineering*, Edmonton, 1-251.
- Chukwuchekwa, N. (2011) "Investigation of magnetic properties and barkhausen noise of electrical steel", PhD Thesis, *Cardiff School of Engineering, Cardiff University*, Wales, 14-18.
- Çınar, C. and Akgün, F. (2007) "Effect of intake valve closing time on engine performance and exhaust emissions in a spark ignition engine", *Journal of Polytechnic*, 10(4), 371-375.
- Demir, E. (2016) "Tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda elektromekanik supap uygulaması ve testi", Yüksek lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 14-40.
- Demir, Ü. (2017) "Elektromekanik supap mekanizması ile değişken supap zamanlamasının hava akış parametrelerine etkisinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 22-34.
- Duchaud, J. L. (2015) "Conception, modélisation et dimensionnement d'un système de levée de soupape à trois positions discrètes pour un moteur essence automobile", These de Doctorat, *Lécole Normale Supérieure Cachan*, Cachan, 23-32.
- El-Cezeri., İ. (1990) Olağanüstü mekanik araçların bilgisi hakkında kitap, *Kültür Bakanlığı Yayınları*, Ankara, 326.
- Fontana, G. and Galloni, E. (2009) "Variable valve timing for fuel economy improvement in a small spark-ignition engine", *Applied Energy*, 86(1), 96-105.
- Giglio, V., Iorio, B., Police, G. and Di Gaeta, A. (2001) "Preliminary experiences in the design of an electromechanical valve actuator", *SAE Technical Paper*, 35.
- Gün, F. (2006) "Değişken supap zamanlamasının motor performansına etkilerinin deneysel incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-84.
- Hajforoush, M., Madandoust, R. and Kazemi, M. (2019) "Effects of simultaneous utilization of natural zeolite and magnetic water on engineering properties of self-compacting concrete", *Asian Journal of Civil Engineering*, 20, 289-300.
- Kamış, Z. (2005) "Supaplar için elektromekanik eyleyici tasarımı ve denetiminin araştırılması", Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 1-165.
- Koch, R.C., Lynch, A.F. and Chlandy, R.R. (2002) "Modeling and control of solenoid valves for internal combustion engines", *2nd IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, Berkeley, 197-202.

- Lee, D., Jiang, L., Yilmaz, H. and Stefanopoulou, A. G. (2010) “Preliminary results on optimal variable valve timing and spark timing control via extremum seeking”, *5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*, Cambridge, 377-384.
- Ma, J., Zhu, G. G. and Schock, H. (2010) “A dynamic model of an electropneumatic valve actuator for internal combustion engines”, *Asme Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 132(2):021007, 1-10.
- Nadarajan, G. (2007) “Islamic automation: a reading of al-jazari’s the book of knowledge of ingenious mechanical devices (1206)”, *Foundation for Science Technology and Civilisation (FSTC)*, 163-178.
- Pulkrabek, W. W. (2016) İçten yanmalı motorlar mühendislik temelleri, Çeviri: Yaşar, H. *Güven Bilimsel Yayınevi*, İzmir 1-5.
- Sağıroğlu, S. (2006) “Buji ile ateşlemeli bir motorda elektromanyetik kumandalı supap mekanizmasının tasarımı, imalatı ve uygulanabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-27.
- Sarıdemir, S. (2009) “İçten yanmalı dört zamanlı bir motor için supap mekanizması tasarımı”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-147.
- Shahid, S. M., Ko, S. and Kwon S. (2019) “Real-Time classification of diesel marine engine loads using machine learning”, *Sensors*, 19(14), 3172.
- Sher, E. and Bar-Kohany, T. (2002) “Optimization of variable valve timing for maximizing performance of an unthrottled SI engine – a theoretical study”, *Energy*, 27(8), 757-775.
- Stockel, M.W., Stockel, M. T. and Johanson, C. (2014) Auto fundamentals 11th edition, *The Goodheart-Willcox Company Inc*, Illinois, 49-67.
- Şefkat, G. (2002) “Bir elektromekanik aygıtın statik ve dinamik karakteristiğinin araştırılması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(3), 273-282.
- Tao, G., Chen, H. Y., J, Y. Y. and He, Z. B. (2002) “Optimal design of the magnetic field of a high-speed response solenoid valve”, *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1-3), 555-558.
- Taşlıyol, M. (2011) “Elektro-mekanik denetimli supap sisteminde değişken supap zamanlaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 14-15.
- Yardım, M. H. (2008) Motor teknolojisi, *Nobel Yayınevi*, Ankara 156-166.
- Zhang, X. and Yang, Y. (2008) “Study on mathematical modeling and response characteristics of high-speed solenoid valve for aero-engine”, *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Gyeongju, 80-83.