

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROMEKANİK SUPAP MEKANİZMASI İLE DEĞİŞKEN  
SUPAP ZAMANLAMASININ HAVA AKIŞ  
PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Üsame DEMİR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ  
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hakan S. SOYHAN

Ekim 2017

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROMEKANİK SUBAP MEKANİZMASI İLE  
DEĞİŞKEN SUBAP ZAMANLAMASININ HAVA AKIŞ  
PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Üsame DEMİR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

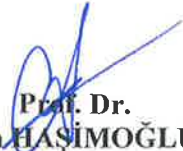
Bu tez 30/10/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.  
Hakan Serhad SOYHAN  
Jüri Başkanı



Prof. Dr.  
İmdat TAYMAZ  
Üye



Prof. Dr.  
Can HAŞİMOĞLU  
Üye



Prof. Dr.  
M. İhsan KARAMANGİL  
Üye



Doç. Dr.  
Cenk ÇELİK  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Üsame DEMİR

30.10.2017

## TEŞEKKÜR

Akademik açıdan en önemli aşama olarak gürülen Doktora sürecinin tamamında bilgi ve tecrübesiyle bulunduğu katkılarından dolayı değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN'a saygı ve Őükranlarımı sunuyorum.

Mevcut alıŐma sayesinde Türkiye'de Şu an üzerinde yoğun bir Şekilde çalıŐılan yerli otomobil çalıŐmalarının yerli motoru konusunda, diğer motor üreticileri ile rakip olabilecek katkılar sunabileceği ve akademik açıdan bir örnek teşkil edeceği hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. Deneysel alıŐma konusunda destek olan Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI ve çalışma ekibine teşekkürü borç bilirim.

Yapmış olduğum bu tez çalışmasına, 114R058 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi ile büyük destek veren TÜBİTAK'a, 2015-50-02-023 numaralı BAP projesi ile doktora çalıŐmama çok büyük katkı sağlayan Sakarya Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca beni bugünlere getiren ve hiçbir zaman haklarını ödeyemeyeceğim annem ve babama, tez çalıŐmam süresince her türlü desteklerini esirgemeyen çok değerli eŐime ve kızıma teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ .....	viii
ÖZET .....	ix
SUMMARY .....	x
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Çalışmanın amacı ve kapsamı .....	2
1.2. Tez İçerik Planı .....	3
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ .....	6
2.1. Yapılan Tez Çalışmaları.....	6
2.2. Deneysel Çalışmalar .....	12
2.3. Analiz Çalışmaları .....	15
BÖLÜM 3.	
İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ZAMAN KAVRAMI VE HAVA AKIŞ KONTROL MEKANİZMALARI .....	21
3.1. İçten Yanmalı Motorlarda Zaman Kavramı.....	22
3.2. İçten Yanmalı Motorlarda Supap Zamanlaması.....	24
3.3. İçten Yanmalı Motorlarda Supap Kontrol Mekanizmaları .....	28
3.3.1. Kamlı supap kontrol mekanizmaları .....	28

3.3.2. Kamsız Supap Kontrol Mekanizmaları.....	30
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMA .....	35
BÖLÜM 5.	
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE MODELLEME .....	41
5.1. Motor Silindir Hacmi ve Manifoldların 3 Boyutlu CAD Modelinin Oluşturulması .....	42
5.2. HAD Analizi İçin Gerekli Düzenlemelerin Yapılması .....	44
5.2.1. Motor parametrelerinin belirlenmesi.....	45
5.2.2. Hacimlere ayırma ve isimlendirme .....	46
5.2.3. Ağ yapısının oluşturulması.....	48
5.2.4. Ağ yapısı ayarları.....	49
5.2.5. Supap Profili oluşturulması .....	50
5.3. Sınır Şartlarının Belirlenmesi ve Yazılıma Aktarılması.....	51
5.4. Ağ Yapısı Optimizasyonu .....	55
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL VE ANALİZ ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	57
6.1. Deneysel Ölçüm Sonuçları.....	57
6.2. Analiz Çalışmasının Doğrulanması .....	60
BÖLÜM 7.	
PARAMETRİK ÇALIŞMA VE SONUÇLARI .....	64
7.1. Elektromekanik Supap Kalkma Profilleri .....	65
7.2. Ağ Yapısı Görüntüleri.....	67
7.3. Hız Dağılım Sonuçları .....	71
7.4. Kütleli Hava Debisi Sonuçları.....	78
7.5. Silindir İçi Basınç Sonuçları .....	80
7.6. Yatay Girdap Sonuçları.....	82
7.7. Dikey Girdap Sonuçları .....	84

7.8. Silindir İçinde Kalan Hava Kütlesi Sonuçları.....	87
7.9. Volümetrik Verim Sonuçları.....	89

## BÖLÜM 8.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME .....	92
------------------------------	----

KAYNAKLAR.....	96
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ .....	104
----------------	-----



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AÖN	: Alt ölü nokta
AÖNÖ	: Alt ölü noktadan önce
AÖNS	: Alt ölü noktadan sonra
dev/dak	: Devir / Dakika
DSZ (VVT)	: Değişken Supap Zamanlaması (Variable Valve Timing)
DSA (VVA)	: Değişken Supap Ayarlaması (Variable Valve Actuation)
EGR	: Egzoz gazı re sirkülasyonu EGR
EgSA	: Egzoz supabının açılması
EgSK	: Egzoz supabının kapanması
EmSA	: Emme supabının açılması
EmSK	: Emme supabının kapanması
EMS	: Elektromekanik supap mekanizması
P	: Basınç, (MPa)
r	: Biyel kolu uzunluğu, (m)
s	: Piston hareket miktarı, (m)
V <sub>c</sub>	: Yanma odası hacmi, (m <sup>3</sup> )
V <sub>d</sub>	: Silindir hacmi (m <sup>3</sup> )
ε	: Sıkıştırma oranı
NSB	: Negatif supap bindirmesi
ÜÖN	: Üst ölü nokta
ÜÖNÖ	: Üst ölü noktadan önce
ÜÖNS	: Üst ölü noktadan sonra
HDSA	: Homojen Dolgulu Sıkıştırmalı Ateşlemeli
(HCCI)	: ( Homogeneous Charge Compression Ignition)
KÖKA	: Kısmi Ön Karışımli Ateşlemeli
(PCCI)	: (Premixed Charge Compression Ignition)

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Dört zamanlı motorun zaman kavramları.....	24
Şekil 3.2. Emme ve egzoz supap hareket profilleri .....	25
Şekil 3.3. Supap zaman ayar diyagramı .....	26
Şekil 3.4. Klasik kam mekanizması.....	29
Şekil 3.5. Elektro-pnömatik supap mekanizması çalışma prensibi .....	31
Şekil 3.6. Elektro-hidrolik supap mekanizması çalışma prensibi.....	32
Şekil 3.7. Elektromekanik supap mekanizması .....	33
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin prensip şeması .....	36
Şekil 4.2. Ultrasonik debimetrenin yapısı.....	37
Şekil 4.3. Ultrasonik debimetre .....	39
Şekil 5.1. Motor üst bloğunun fotoğrafları .....	42
Şekil 5.2. Tarama sonucu motor üst bloğunun CAD modeli .....	43
Şekil 5.3. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği için gerekli model .....	44
Şekil 5.4. Ansys ara yüzü .....	45
Şekil 5.5. Deneysel motor ile ilgili parametrelerin girildiği kısım .....	45
Şekil 5.6. Klasik kam mili profiline bağlı supap kalkma yüksekliği.....	46
Şekil 5.7. Modelin içe aktarılması ve montaj esnasında dikkat edilmesi gereken husus.....	47
Şekil 5.8. Parçalara ayırma işlemi gerçekleştikten sonraki geometri .....	47
Şekil 5.9. Ağ parametrelerinin ayarlanması.....	48
Şekil 5.10. Genel ağ yapısı boyutu ve analiz başlangıç-bitiş zamanlaması.....	49
Şekil 5.11. Motorun standart zamanlaması için HAD yazılımına göre supap profili .....	51
Şekil 5.12. Deneysel ve analiz ortamında emme manifoldu kesitleri.....	52
Şekil 5.13. Emme ve egzoz süreci basınç grafikleri.....	53
Şekil 5.14. HAD yazılımı ara yüzü .....	54

Şekil 5.15. Sınır koşulları .....	54
Şekil 5.16. Farklı global ağ boyutunun silindir içi basınca etkisi .....	56
Şekil 5.17. Farklı global ağ boyutunun kütleli hava debisine etkisi.....	56
Şekil 6.1. Deneysel silindir içi basınç grafikleri.....	59
Şekil 6.2. Deneysel kütleli hava debisi .....	60
Şekil 6.3. Silindir içi basınç grafikleri .....	61
Şekil 6.4. Kütleli hava debisinin devir ile değişimi .....	62
Şekil 6.5. Volümetrik verimin devir ile değişim grafiği.....	63
Şekil 7.1. Değişken supap zamanlaması ile elektromekanik supap profilleri.....	66
Şekil 7.2. 1120 KMA emme supabı dinamik ağ yapısı görüntüleri .....	68
Şekil 7.3. 900 KMA Egzoz Supabı Dinamik Ağ Yapısı Görüntüleri .....	70
Şekil 7.4. 1160 KMA silindir içi ve manifold hız dağılımı .....	73
Şekil 7.5. 1200 KMA silindir içi ve manifold hız dağılımı .....	75
Şekil 7.6. 1260 KMA silindir içi ve manifold hız dağılımı .....	77
Şekil 7.7. Emme manifoldu kütleli hava debisi.....	79
Şekil 7.8. Silindir içi basınç grafiği .....	81
Şekil 7.9. Yatay girdap (Swirl Ratio).....	83
Şekil 7.10. Dikey girdap (Tumble) X .....	85
Şekil 7.11. Dikey girdap (Tumble) Y .....	86
Şekil 7.12. Silindir içinde kalan toplam kütle .....	88
Şekil 7.13. Volümetrik verimin devir ile değişimi .....	90

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Test motorunun teknik özellikleri .....	37
Tablo 4.2. Elektrik motorunun teknik özellikleri .....	37
Tablo 4.3. Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerin doğruluk-belirsizlik değerleri.	40
Tablo 5.1. Motorun standart supap zamanlaması ve maksimum supap kalkma yüksekliği .....	52
Tablo 6.1. Emme (giriş) ve egzoz (çıkış) hava sıcaklığı değerleri .....	59
Tablo 6.2. Emme (giriş) ve egzoz (çıkış) hava basıncı değerleri .....	60
Tablo 7.1. 1120 KMA Emme Supabı kalkma miktarı.....	71

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Elektromekanik Supap Mekanizması, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Değişken Supap Zamanlaması

İçten Yanmalı Motorlara getirilen zorunlu emisyon kısıtlamaları nedeniyle Ar-Ge çalışmaları her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Bu çalışmalar, içten yanmalı motorların yanma verimliliği, güç, tork, emisyon gibi parametrelerinin iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Geçmişte yanma odasına alınan hava miktarını arttırmak için tek supaplı sistemlerden çift supaplı sistemlere geçiş ile ilk adım atılmıştır. İçten yanmalı motorlarda, supap zamanlamaları motorun en ideal çalışma koşulları için optimize edilip, tüm devirlerde sabit açılma ve kapanma zamanlaması ile çalışmaktadır. Bu sebeple optimum devir dışında kalan devirlerde supapların ideal açık kalma süreleri farklılık göstermekte ve beklenen volümetrik verim elde edilememektedir. Volümetrik verimi arttırmak için değişken supap zamanlaması konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda elektronik kontrol ünitelerinin gelişimi ile aktif supap kontrolünün çok daha etkin bir şekilde yapılabildiği kamsız motor teknolojileri konusunda çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada konvansiyonel kam milinin kullanıldığı tek silindri buji ateşlemeli bir motorda hava debileri, volümetrik verim, hava akış hızları ve silindir içi basınç değerleri deneysel olarak tespit edilmiştir. Deneysel motorun yanma odası, emme ve egzoz portlarının akış hacimleri kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile soğuk akış analizleri yapılmıştır. Farklı devirlerde yapılan analizler deneysel verilerle doğrulandıktan sonra elektromekanik supap mekanizması (EMS) durumu için ortaya çıkan kam profilleri kullanılarak analizler tekrarlanmıştır. EMS kullanılması durumunda sağlanabilecek emme supabı açılma (EmSA) zamanının erkene alınması ve egzoz supabının kapanmasının (EgSK) erkene alınması ve geçe alınması durumları HAD analizleri ile modellenmiştir. Her bir devir için farklı kam profillerinin kullanıldığı analizlerde volümetrik verim, hava debisi, silindir içi basınç değerleri, yatay ve dikey girdap, silindir içerisinde kalan toplam kütle ve hava akış hızları sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler neticesinde düşük devirlerde EMS kullanılmasının standart supap kalkma miktarı ve zamanlamasına göre volümetrik verimi düşürdüğü, yüksek devirlerde ise volümetrik verimi arttırdığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre emme supabının kapanma zamanının volümetrik verime olan etkisinin önemli olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanında EMS sisteminin yatay girdabı önemli derecede etkilediği bu çalışma ile ortaya konmuştur.



# **INVESTIGATION OF VARIABLE VALVE TIMING WITH ELECTROMECHANICAL VALVE MECHANISM EFFECTS ON AIR FLOW PARAMETERS**

## **SUMMARY**

Keywords: Electromechanical Valve Mechanism, Computational Fluid Dynamics, Variable Valve Timing

Due to the mandatory emission restrictions imposed on the Internal Combustion Engines, R & D work is getting more important each day. These studies focus on improving parameters such as combustion efficiency, power, torque, and emission of internal combustion engines. In the past, for the first step was to switch from single-valve systems to double-valve systems to increase the amount of intake air at the combustion chamber. In internal combustion engines, the valve timings are optimizing for the ideal operating conditions of the engine and operating with a constant opening and closing timing at all revolutions. For this reason, the ideal opening times of the valves differ at cycles apart from optimum cycle, and the expected volumetric efficiency cannot be obtained. To increase the volumetric efficiency studies are continuing on variable valve timing. In recent years, with the development of electronic control units studies are focusing on camless engine technology where active valve control can be done more efficiently. In this study, volumetric efficiency, air flow rates and cylinder pressure values were experimentally determined for a single-cylinder spark ignition engine having conventional camshafts. Cold flow analysis was carried out using computational fluid dynamics (CFD) method with importing combustion chamber and flow volumes of the suction and exhaust ports of the engine. After validating analyzes results with experimental data for different revolutions, analyses repeated using electromechanical valve mechanism (EMS) cam profiles. In case of using EMS, the advancing intake valve opening time and exhaust valve closing advancing and retarding are simulated with CFD software. Simulations where different cam profiles used for each revolution, volumetric efficiency, in-cylinder pressure, swirl and tumble ratio, in-cylinder total mass and air flow rates in the cylinder were investigated numerically. As a result of the obtained data, it was seen that the use of EMS at low revolutions decreased the volumetric efficiency according to the conventional camshaft valve lifting amount and timing, and increased the volumetric efficiency at high revolutions. According to the results, it was understood that the effect of intake valve closing time is important on volumetric efficiency. Additionally, this study shows that swirl ratio is significantly affected by EMS system.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde yapılan bilimsel araştırmalar petrol kökenli yakıtların 50 yıl gibi bir süre sonra tükeneceğine işaret etmektedir [1]. Otomotiv sektörünün bu sınırlı rezervine bağlı olarak her geçen gün yeni bir Ar-Ge alışması içinde olduğu otomotiv sektöründe görölmektedir. Ar-Ge alışması olarak ön planda olan konular ise yakıt tasarrufu, alternatif yakıt ve alternatif enerji kaynaklarıdır. Bu konular içerisinde alternatif yakıtların geliştirilmesi hususunda sıkıntılar mevcuttur. Bazı ölkelerde alternatif yakıtların, belirli oranlarda yakıtta karıştırılarak kullanıldığı bilinmektedir. Enerji piyasası düzenleme kurumu tarafından yayınlanan “Motorin Türlerine Biyodizel Harmanlanması Hakkında” tebliğde Ölkemizde de 2018 yılı itibari ile binde 5 oranında katkı olarak dizel yakıtlara biyodizel katılması zorunluluğu gelmiştir [2].

Alternatif enerji kaynaklarından ise şu anda en ön planda bulunan elektrikli araç konseptidir. Elektrikli araçlar enerjinin nereden temin edildiğine bağlı olarak yeşil taşıtlar olarak tanımlanmaktadır. Fakat elektrikli araçlarda şarj süresi ve batarya hala büyük bir problem ve bu konuda çalışmalar devam etmektedir. Bu alışmalar tamamlansa bile elektrikli araç sayısının artması ile elektrik arz-talep dengesinin bozulacağı düşünölmekte [3] ve elektrik üretimi için yine fosil kaynaklı yakıtların kullanılması gerekebilecektir. Bu nedenle içten yanmalı motor konusunda halen Ar-Ge alışmaları devam etmektedir. İçten yanmalı motora sahip taşıtlar ilk üretilmeye başladıklarında az silindir sayısı, düşük sıkıştırma oranı ve güce sahiptirler. Malzeme teknolojisi ve bilgisinin artması ile motor teknolojisi ivmelenme kazanmıştır. Fakat gün geçtikçe artan araç sayısı ve buna bağlı olarak karbon salınımının ve evre kirliliğinin özellikle büyükşehirlerde fazlalaşması nedeniyle dünya ölkeleri arasında alınan ortak kararlar ile içten yanmalı motorlu taşıtlara emisyon kısıtlamaları getirilmiştir. Emisyon kısıtlamalarının diğer bir anlamı da taşıtlarda yakıt

tasarrufudur. Bu kısıtlamalar ile içten yanmalı motorların düşük emisyon ve yakıt tüketimi konusunda gelişimi büyük bir ivme kazanmıştır. Yakıt tasarrufu için içten yanmalı motorlarda yakın zamanda motor geometrisi, değişken supap zamanlaması (DSZ) ve turbo aşırı doldurma konularında iyileştirmeler yapılmıştır. Bunun yanında motorda parça sayısının artması ve sensör teknolojilerinin gelişimi ile elektronik kontrol yöntemleri de büyük bir önem kazanmıştır. Elektronik kontrol sayesinde içten yanmalı motorlarda enjeksiyon, aktif silindir teknolojisi, değişken supap zamanlaması gibi konular ile yakıt tasarrufu konusu ön plana çıkmıştır. Elektronik kontrolde yaşanan bu gelişmeler ile motordaki çoğu mekanik aksamın mekatronik sistemler ile iyileştirilmesi sağlanmıştır. DSZ ile motorda istenilen tork ve güç bunun yanında yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu bağlamda DSZ ve değişken supap ayarlama (DSA) kontrolü sağlayan kamsız motor teknolojisi olarak da adlandırılan EMS mekanizmaları ön plana çıkmıştır. Klasik kam mekanizması, krank mili ile triger kayışı vasıtasıyla bağlı olan kam mili vasıtasıyla supapların açılıp-kapanma kontrolleri yapılmaktadır. EMS mekanizmasında ise, solenoid supap yani üzerinde bulunan mıknatıs vasıtasıyla supabın açılıp kapanma kontrolü sağlanmaktadır. Bu sayede sonsuz bir DSZ sağlanabilmektedir. EMS mekanizması konusunda çalışmalar devam etmekle birlikte düşük elektriksel güç kullanımı ile supaplar her devire göre optimum açılıp-kapanma istenmektedir. Elektronik kontrol ünitesinin EMS sistemini kontrolü ile içten yanmalı motorların düşük devirden yüksek devire kadar her devirde optimum volümetrik verim alınmasını sağlayacaktır. Sınırsız DSZ'nin yanında motorun triger kayışı, kam mili vs. gibi mekanik parçalarının olmayışı sayesinde mekanik verimin artışı ile yakıt tasarrufu sağlayacağı aşikârdır.

### **1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

İçten Yanmalı Motorlar, getirilen emisyon sınırlamaları nedeniyle her geçen gün artan bir oranla çalışma konusu olmaya devam etmektedir. Emisyon kısıtlamaları ile birlikte içten yanmalı motorlarda yanma verimliliğini arttırmak ve buna bağlı olarak yakıt tasarrufu ve emisyon azaltımı sağlamak için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar genel olarak yakıt püskürtme optimizasyonu, optimum hava akış optimizasyonu, silindir çatı geometrisi optimizasyonu, piston üstü geometrisi

optimizasyonu, alternatif yakıtlar, emme manifoldu optimizasyonu, DSZ vs. gibi konular üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, motor supaplarının klasik kam mekanizması yerine EMS mekanizması ile çalıştırılmasının durumunda volümetrik verim, kütleli hava akış debisi, yatay girdap ve dikey girdap gibi parametrelere olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında ise deneylerde tek silindirik buji ateşlemeli bir motor kullanılarak standart kam ile silindir içi basınç ve kütleli hava akış debileri ölçülmüş ve HAD yazılımı ile deneysel koşullar kullanılarak doğrulaması yapılmıştır.

Doğrulama çalışmasının ardından literatürdeki EMS mekanizması ile yapılmış çalışmalar incelenerek supapların tepki süresi seçilmiştir. Seçilen bu süreye göre EMS supap hareket profilleri oluşturulmuştur. EMS mekanizması kullanılarak standart zamanlamaya göre, emme supabının 5 ve 10 derece erken açılması durumu ve egzoz supabının 5 derece erken ve 5 derece geç kapanması durumlarına göre değişken supap zamanlamaları belirlenmiştir. HAD yazılımında belirlenen supap açılma stratejilerine göre analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda EMS mekanizması ile DSZ uygulamasının etkisi ortaya konmuştur.

## **1.2. Tez İçerik Planı**

Sekiz bölümden oluşan bu tez çalışmasının her bir bölümüne ait içerik aşağıda sıralanmıştır.

Giriş bölümü genel olarak içten yanmalı motorlarda kamsız motorların gelişiminden bahsetmektedir. Ayrıca yapılan bu tez çalışmasının amacı ve kapsamının anlatıldığı ve tezin içerik planının yer aldığı bölümdür.

Tez konusu hakkında daha önce yapılmış çalışmaların yer aldığı Bölüm 2’de detaylı bir literatür taraması yapılmış ve 3 başlık altında ayrıntıları verilmiştir. Literatür araştırmasının sonucunda tez konusunun seçilme nedenleri anlatılmıştır.

Bölüm 3’de içten yanmalı motorlarda zaman kavramı, supap zamanlaması, supap kontrol mekanizmaları hakkında bilgiler verilmiştir. İçten yanmalı motorların sınıflandırılmasından bahsedilmiştir. Burada zaman kavramı içinde motor çevrimindeki iki ve dört zamanın temsil ettiği noktalar açıklanmıştır. Supap zamanlaması hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Supap kontrol mekanizmaları sınıflandırılmış ve bunlar hakkında açıklamalar yapılmıştır.

Bölüm 4’de yapılan deneysel çalışmada seçilen motorun teknik bilgileri verilmiştir. Ayrıca deneysel ekipmanlar hakkında kısaca bilgiler verilmiştir. Emme havasının kütleli debisini ölçen ultrasonik debimetre cihazının çalışma prensibi hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 5’de HAD yazılımında yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Bu çalışma için ilk önce katı modelin oluşturulma yönteminden bahsedilmiştir. Oluşturulan katı model sonrasında HAD modelinin oluşturulması için gerekli adımlar tespit edilmiş ve bu adımlar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Ardından ağ yapısı için gerekli koşullar ve bu koşullar için gerekli sınır şartları deneysel prosedür ve veriler belirlenerek detaylı bilgilere yer verilmiştir.

Bölüm 6’da standart kam ile yapılan deneysel çalışma ile elde edilen ölçümler verilmiştir. Daha sonra nümerik olarak yapılan çalışmanın sonuçları deneysel çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 7’de tez çalışması kapsamında belirlenen EMS profilleri ile yapılan nümerik çalışma sonuçlarına yer verilmiştir. Nümerik çalışma sonuçlarından; krank açısına bağlı silindir içi basınç, krank açısına bağlı kütleli hava debisi, krank açısına bağlı yatay girdap, dikey girdap, silindir içinde kalan hava kütlesi, volümetrik verim, emme manifoldu kesitinden geçen havanın kütleli debisi, manifold ve silindir içi

havanın hız hareketlerinin görselleri, ağ yapısının görsellerine yer verilmiştir. Bu sonuçların hava akışına etkileri konusunda açıklamalarda bulunulmuştur.

Deneysel ve analiz çalışmaları sonucunda elde edilen veriler kullanılarak tez çalışmasının genel bir değerlendirilmesinin yapıldığı Bölüm 8'de ayrıca yapılacak sonraki çalışmalar için öneriler verilmektedir.



## **BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ**

Bu bölümde tez konusu ile ilgili şimdiye kadar yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Literatür özeti incelemesi yapılırken daha önce yapılan çalışmalar 3 alt başlıkta toplanmıştır. İlk alt başlık daha önce konu hakkında yapılmış olan tez çalışmalarıdır. Bu başlık altında DSZ ve EMS mekanizmaları konusunda yapılmış olan deneysel ve analiz açısından tüm çalışmaları içermektedir. İkinci alt başlık deneysel çalışmalar başlığı altında EMS mekanizması ve DSZ ile ilgili yapılan deneysel makale çalışmaları içermektedir. Üçüncü ve son başlık ise silindir içi hava akış analizi konusunda yapılan tüm çalışmalar analiz çalışmaları başlığı altında detaylı olarak verilmiştir.

### **2.1. Yapılan Tez Çalışmaları**

Bu kısımda konu hakkında yapılmış tez çalışmaları ele alınmıştır. Yapılan tez çalışmalarında genellikle EMS sistemi kontrolü, tasarımı ve uygulanabilirliği konusunda çalışmalar yapıldığı anlaşılmaktadır.

Reinholz yapmış olduğu çalışmada EMS mekanizması olarak yeni bir tasarım önerisinde bulunmuştur. Önerdiği tasarımda bir DC motor sayesinde supabın hareketi sağlanmakta ve istenilen hız ve profili elde edilebilmektedir. Tasarımının ilk önce analizlerini ardından deneysel çalışmalarını gerçekleştirmiş ve diğer EMS mekanizmalarından daha basit bir yapıda olduğunu ve daha işlevsel bir yapısının bulunduğunu savunmaktadır. Önerdiği mekanizmanın enerji kaybının önemli ölçüde azalttığı ve bunun literatürde yayınlanan en verimli EMS'ye göre% 40 daha az kayba yol açtığını bulmuştur [4].

Demir yapmış olduğu tez çalışmasında EMS sistemi kullanarak yapmış olduğu performans ve emisyon testlerini klasik supap mekanizması ile yapılan performans ve emisyon testleri ile karşılaştırmıştır [5].

Birgöl yapmış olduğu tez çalışmasında EMS sistemi tasarımı gerçekleştirmiş ve geliştirmiştir. EMS sistemlerinde en önemli parametre sistemin geçiş süresi veya tepki süresi yani supabın maksimum açılma mesafesine ulaştığı süredir. Bu sürenin kısaltılması açısından yaptığı geliştirmeler sayesinde hareketli kütleyi azaltarak tepki süresini 6 mm açılma için 3,9 ms ve 8mm için ise 4,4 ms süresinde gerçekleştirdiğini ölçmüş ve bu sürelerde motorun yaklaşık 6000 dev/dak ya kadar çalışabileceğini ortaya koymuştur [6].

Aygöl yapmış olduğu çalışmada buji ateşlemeli içten yanmalı bir motorun geleneksel kam mekanizması yerine tasarlamış olduğu EMS mekanizmasını kullanarak belirli devir ve emme supabı açılma zamanlarında testler gerçekleştirmiştir. Bu testlerin sonucunda emme supabının açık kalma sürelerini, silindir içi basınçları, emme bobininde harcanan güç miktarlarını ölçmüş ve teorik hesaplamalarla karşılaştırmıştır [7].

Uysal yapmış olduğu çalışmada tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda değişken supap kalkma miktarının volümetrik verim, tork, güç, özgül yakıt tüketimine etkisini incelemiştir. Değişken supap kalkma miktarı için kam milindeki emme supabı iticisini iptal ederek onun yerine 6 bar basınç ile çalışan elektronik kontrollü pnömatik bir sistem tasarlayarak gerçekleştirmiştir. Düşük devirlerde standart supap kalkma miktarından daha az, orta devirlerde standart supap kalkma miktarında ve yüksek devirlerde ise daha fazla supap kalkma miktarına göre 3 farklı devirde etkisini çalışmıştır. Deneylerde en yüksek volümetrik verim artışını, düşük motor devrinde daha az supap kalkma miktarında elde etmiştir En yüksek moment artışı yüksek motor devrinde yüksek supap kalma miktarında, en yüksek güç artışı yüksek motor devrinde yüksek supap kalkma miktarında ve özgül yakıt tüketimindeki en yüksek azalma yüksek motor devrinde yüksek supap kalkma miktarında gerçekleştiğini deneysel olarak ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar neticesinde



motor devrine bağlı olarak farklı yüksekliklerde supap açılma miktarlarının motor performansını olumlu yönde etkilediğini keşftmiştir [8].

Taşlıyol yapmış olduğu çalışmada bir yüksek, bir de düşük devir için EMS sistemini 24 V ve 48 V olmak üzere iki besleme gerilimi için test etmiştir. Besleme geriliminin düşük devirler için farklı açılma ve kapanma avans değerlerinin 24V ve 48V besleme geriliminde aynı olduğu, bu nedenle düşük voltaj değerinde çalışabileceğini fakat yüksek devirde ise zıt elektromanyetik kuvvet nedeniyle 48 V yüksek voltaj değerinin kullanılmasını önermiştir [9].

Akbaş yapmış olduğu çalışmada emme supabı için değişken supap kalkma miktarı ve zamanlamasını incelemiştir. Emme supabı kalkma miktarı azaltıldıķca orijinal supap kalkma değerine göre düşük devirlerde daha iyi performans değerleri elde etmiştir. Emme supabı zamanlaması avansa alındığında düşük devirlerde, rtara alındığında ise yüksek devirlerde orijinal zamanlama değerinden daha iyi performans değerlerine ulaşıldığını ortaya koymuştur [10].

Beauquel yapmış olduğu çalışmada 0.45 litrelik Lotus marka tek silindirli motorun zamana bağlı akış çözümünü HAD modelleme yöntemi ile yapmıştır. Deneysel bir sonuç ile doğrulama aşamasından sonra silindir sıcaklığını, sıkıştırma esnasındaki karışım dağılımını ve otomatik ateşleme zamanlamasını tahmin etmek için HAD kodu ile bir kimyasal kinetik modeli birleştirmiştir. Çalışmanın ilk kısmı hesaplanan silindir içi hızların doğrulanmasına odaklanmıştır. Ağ yapısı optimizasyonu için ağ duyarlılığı çalışması ve farklı türbülans modelleri karşılaştırması yapılmıştır. Silindir içindeki dolgu gecikmesi ve dolgu miktarı üzerine motor devrinin etkileri, silindir içi akış alanının gelişimi ile emme ve sıkıştırma kursu sırasındaki türbülans parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmı, benzin karışımı ve silindir içindeki farklı gaz kalıntılarını muhafaza etmek için supap zamanlamasının değişimi içermektedir. Modelin doğrulanması yapıldıktan sonra, supap zamanlamasının akış ve motor parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmak için HAD hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar daha sonra DSZ'nin faydalarını incelemek için tam homojen bir karışım modeli ile karşılaştırılmıştır. Emme ve egzoz

supabı sürelerinin azaltılması, otomatik ateşlemeden önce bir karışım sıcaklığı katmanlandırma ve bir yakıt konsantrasyonu dağılımı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ısı salınım hızının uzatılmasına ve yanmayı geliştirmesine neden olmuştur. Bununla birlikte, daha kısa valf zamanlaması süreleri de, silindirin gösterdiği verimliliğin azalması ile ısı transferi, pompalama kayıpları ve sürtünme gücünde bir artış göstermiştir. Otomatik ateşlemeyi kontrol (CAI) etmek için bir yöntem olan supap zamanlaması, yalnızca CAI motorlarının yük limiti iyileştirildiğinde kullanılmalıdır [11].

Horasan, yapmış olduğu çalışmada çift döngülü yanma odalı dizel motorunun silindir içi akışı incelemiştir. Yapılan çalışmada emme, yakıt püskürtme, karışım oluşumu ve egzoz aşamaları yanmasız ve sabit bir devir için incelemiştir. Analiz çalışmaları Ansys Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirmiştir. Ağ yapısının uygunluğu teyit edildikten sonra akış analizi için gerekli parametreler tanımlamıştır. Analizi tam bir döngü için gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler sonucunda silindir içinde oluşan döngü miktarı açısından incelemiştir [12].

Saridemir yapmış olduğu çalışmada imalatı yapılan bir deney motorunun kam millerinin tasarımı ve imalatını gerçekleştirmiştir. Yeniden imal edilen kam millerinin testini motor üzerinde gerçekleştirerek supap kalkma miktarının aynı kalması durumunda, dört farklı supap zamanının motor performansına etkisini incelemiştir. Sonuç olarak supap zamanlarından 130 KMA açık kalma süresine sahip olan kam milinde en iyi volümetrik verim sağlanmış ve imalatı yapılan motorda sürtünme kayıplarının çok yüksek olduğu ve bunu gidermek için yağlama sisteminin tam basınçlı sisteme dönüşmesi gerektiğini de vurgulamıştır [13].

Savcı yapmış olduğu çalışmada içten yanmalı bir motorun silindir içi akış analizlerini iki farklı sıkıştırma oranı ve iki farklı türbülans modeli için STAR-CD yazılımını kullanarak 2 boyutlu olarak gerçekleştirmiştir. Yapılan analiz çalışmalarını Lazer Doppler Anemometre ile elde edilmiş silindir içi hava akış hızlarıyla karşılaştırmıştır. Analiz çalışmasında RNG ve k-ε türbülans modelleri kullanmıştır. Sonuç olarak ise Lazer Doppler Anemometre ölçümleri ile RNG ve k-ε türbülans modeli sonuçları

incelediğinde RNG türbülans modelinin daha iyi ortalama aksenal hız ve türbülans oluşturduğunu ortaya koymuşlardır [14].

Seeman yapmış olduğu çalışmada tek silindri bir motorunun yatay girdap (swirl) değerinin tespiti için deneysel ve analiz çalışması gerçekleştirmiştir. Analiz çalışması için Solidworks FloWorks yazılımını kullanmıştır. Buradan elde ettiği silindir içi hız değerlerinden yatay girdap değerini hesaplayarak deneysel olarak ölçüm yaptığı değer ile karşılaştırmıştır. Analiz sonuçlarının yüksek yatay girdap değerinde deneysel sonuçlara çok yakın olduğu fakat düşük yatay girdap değerinde ise deneysel sonuca yaklaşma hata oranının yüksek olduğunu görmüşlerdir. Bunun nedeninin, çizimin solidworks yazılımı kullanılarak yapıldığı ve geometri hassasiyetinden kaynaklanabileceğini ifade etmiştir [15].

Qiu yapmış olduğu çalışmada spesifik bir değişken supap ayarlama (DSA) sistemi ve içten yanmalı motorda DSZ'yi sağlamak için EMS mekanizması önermişlerdir. Çalışmanın amacı, daha küçük bir pakete (motor kafası üzerindeki sınırlı alana sığması), daha hızlı bir geçiş süresine (daha hızlı motor devrine uyum sağlamak için) ve daha düşük güç tüketimi sağlayarak EMS sistemini daha pratik bir seviyeye getirmektir. Çalışmanın sonucunda güç tüketimi 140 W'den 50 W'a (yaklaşık% 64) düşürülmüş, geçiş süresi 3.3 ms'den 2.7 ms'e düşürülmüş ve son aktüatör hacmi orijinal motora göre 1/7 olarak azaltılmıştır. Bu önemli gelişmeler, makul bir güç tüketimi ve yüksek motor devri ile 4 silindri 16 valfli bir içten yanmalı motor için bağımsız valf tahrikinin kullanılabilmesini mümkün kılmıştır [16].

Chladny yapmış olduğu çalışmada içten yanmalı motorlarda EMS mekanizmasının kullanımı konusunu araştırmış ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Kullanılan bobinlerin ilk önce manyetik alan ve benzeri özelliklerinin testini MATLAB ve Ansys yazılımını kullanarak analizlerini gerçekleştirmiş ve ideal durumu belirledikten sonra imalatı yaparak deneysel çalışmalar yapmış ve sonuçları karşılaştırmıştır. Sonuçların uyumlu olduğunu ortaya koymuştur [17].

Doğan yapmış olduğu çalışmada tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda emme supabının EMS mekanizması ile kontrolü olması ve standart supap zamanlaması durumunda, motorun performans ve egzoz emisyonlarına olan etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Yapmış olduğu deneysel çalışmanın sonucunda, tam yük ve 1600-3600 dev/dak aralığında 200 dev/dak aralıklarla alınan tüm ölçümlerde, elektro-mekanik supap mekanizması kullanılması durumunda kam mili ile çalışmasına göre motor momenti ve gücünde ortalama %7,9 oranında bir artış tespit etmiştir. Bu artışın özellikle emme supabı ve supap bindirme kesit alanının artması ve mekanik kayıpların azalması ile gerçekleştiğini savunmuştur. Bu etki, özellikle orta hızlarda motor performansına yansımıştır. Özgül yakıt tüketiminde ise %36'lık bir iyileşme olduğunu ölçmüştür. Özgül yakıt tüketimindeki bu iyileşme volümetrik verim artışı ve mekanik kayıpların azalmasından kaynaklanmaktadır. EMS mekanizması kullanılması durumunda kam mili ile çalışan motora göre bütün devir aralıklarında, CO emisyonlarında iyileşme, CO<sub>2</sub>, HC ve NO<sub>x</sub> emisyonlarında ise bir artış olduğunu ortaya koymuştur [18].

Sağiroğlu yapmış olduğu çalışmada tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda emme supabının EMS mekanizması ile kontrollü olması ve değişken emme supabı açma ve kapama zamanlaması durumunda üç farklı devir ve iki farklı sargı tipine göre motorun performansına olan etkisini deneysel olarak araştırmıştır [19].

Gün yapmış olduğu çalışmada klasik supap zamanlaması yerine emme supabının fazını sürekli olarak değiştirebilen bir mekanizma ile DSZ'yi gerçek zamanlı şasi dinamometresi üzerine bağlanmış bir taşıt üzerinde 2000-6500 dev/dak aralığında deneysel olarak çalışmıştır. Çalışmanın sonucunda 2000-3000 dev/dak aralığında DSZ'nin standart supap zamanlamasına yakın olması nedeniyle fayda sağlamadığı görülmüştür. Üst devirlerde ise taşıtın özgül yakıt tüketimi tork ve güç değerlerinde önemli artışlar sağladığını görmüştür [20].

## 2.2. Deneysel Çalışmalar

Literatür araştırmasında görüldüğü üzere deneysel çalışma olarak DSZ ile ilgili birçok çalışma olduğu EMS mekanizması konusunda ise yapılan çalışmaların özellikle kontrol ve supap açma kapama süreleri ile ilgili olduğu görülmüştür.

Chang ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada supap mekanizması üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Klasik supap mekanizması ve standart bir EMS mekanizmasına alternatif olarak EMS sürücülü bir sistem önerisinde bulunmuşlardır. Önerdikleri bu EMS mekanizması bir DC motor, yeni tasarım bir kam, elektronik kontrol ünitesi ve yaylardan meydana gelmektedir. Bu sayede DC motorun istenilen hızda ayarlanması yapılarak farklı devirlerde istenilen supap açılma-kapanma hızlarının elde edileceğini önermişlerdir [21]. Çınar ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada buji ateşlemeli bir motorda emme supabının kalkma miktarının emisyon ve performansa etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda düşük devirlerde supap kalkma miktarının düşük olması durumunda motor performansının iyileştiği görülmüştür. Yüksek devirlerde ise supap kalkma miktarının fazla olması durumunda motor performansı iyileşmektedir. Sonuç olarak devir ile sürekli değişken dinamik bir supap kalkma miktarının motorun performansına ve emisyon değerlerine önemli oranda iyileştireceğini önermişlerdir [22]. Kamış ve Yüksel yapmış oldukları çalışmada EMS mekanizmalarında tasarım parametrelerinin etkisini incelemiştir. Bu inceleme için Matlab-Simulink yazılımını kullanarak iki model üzerinden EMS mekanizmasının çalışmasına etkisi bulunan her bir parametrenin dinamik etkisini ayrı ayrı incelemiştir. Sonuç olarak sistemin tepki süresinin EMS mekanizmasında önemli bir etken olduğu ve bunun azaltılmasının motorda olumlu etkiler oluşturacağını düşünerek mıknatıs devresi ve yay katsayısı değişmeksizin hareketli kütlelerin azalması ile tepki süresinin en aza indirilebileceğini ortaya koymuştur [23]. Cope ve Wright yapmış oldukları çalışmada tek silindirli buji ateşlemeli bir motor için EMS mekanizmasını emme supabının kontrolü için deneysel olarak çalışmışlardır. Sonuçlar EMS mekanizmasının değişken zamanlama, değişken kaldırma ve düşük supap iniş hızı gibi tamamen esnek supap aktüatörünün doğal avantajlarını sergilediğini göstermişlerdir [24]. Liu ve diğerleri, yapmış oldukları

çalışmada manyetik akı bobin uyarımı ve daimi mıknatıslar ile birleştirilen hibrit manyetik-motorlu kuvvet (MMK) uygulamasını içeren bir EMS mekanizması önermişlerdir. Önerilen EMS sistemi, ayrılmış akı düzenlemesinden faydalanarak, düşük güç kaynağı gereksinimi ve daha az elektrikli cihaz bileşeni ile DSZ özelliklerini yerine getirmek için kullanıla bilinmiştir. Bu sistemin supabı itmek için ayrı ve tutmak için ayrı akım gönderme özelliği sayesinde daha az ısınma ve daha düşük güç tüketimi sağladığını bu çalışma ile ortaya koymuşlardır [25]. Gaeta ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada hibrit analitik-sonlu elemanlar metodu (SEM) yaklaşımına dayanan bir EMS'nin derinlemesine toplu parametre modeli sunmuşlardır. SEM modellerinin iyi bilinen tahmini davranışını gömerek bir EMS mekanizması geliştirmişlerdir. Modelin dinamik davranışının iyiliği, farklı çalışma koşullarında aktüatörün zamana bağlı SEM simülasyonunda denemiş ve ilk supap hareketi ile başa çıkmak için kapalı çevrim kontrol stratejileri geliştirmeye odaklanmıştır [26,27].

Wong ve Mok yapmış oldukları çalışmada tamamıyla değişken supap zamanlamalı elektromekanik bir supap mekanizması önermişlerdir. Değişken supap sisteminin matematiksel modelinin oluşturulması ve dinamik analizi ile bazı tasarım konuları sunulmuştur. Deneysel ve analiz sonuçları, yeni elektromekanik değişken supap sisteminin, kompleks kontrol sistemlerini kullanmadan tamamıyla değişken supap zamanlaması ve kaldırma kontrolü elde edebildiğini ve benzinli motorlarda geleneksel gaz kelebğini ortadan kaldırma potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir [28]. Chladny ve Koch yapmış oldukları çalışmada geri besleme sensörleri, yumuşak oturma veya iniş kontrolü, bozukluk reddi ve ileri besleme tasarımı konularını ele alan bir otomotiv solenoid değişken valf zamanlama aktüatörü için kapsamlı bir kontrol stratejisi sunmuşlardır. Doğrusal olmayan bir gözlemci kullanarak egzoz gazı basıncına bağlı sıkıştırılabilir akış bozukluklarını modelleme ve karakterize etme yöntemi de sağlamışlardır. 42 V'luk bir kaynak ve yanma bozukluklarında büyük değişikliklerle sınırlı olmasına rağmen kombine kontrol, deneysel olarak onaylanmış bir simülasyon modeli ve test tezgah aparatı üzerinde umut verici sonuçlar ortaya koymuştur. Sonuçlar, kontrol stratejilerinin geliştirilmesi ve test edilmesi için yeterli doğruluğu olan bir simülasyon modelinin gösterilmesinin

yanı sıra 0.1 m/s kriterini sağlayan deneysel bir etkiyi göstermektedir. Bu sonuçlar, gerçek bir motorda uygulanabilen bir akı sensörü tarafından sağlanan geri besleme ile elde edilmiştir [29]. Özdalyan ve Doğan yapmış oldukları çalışmada tek silindirli üstten kamlı buji ateşlemeli bir motorun emme supabı için elektro-mekanik supap (EMS) mekanizması kullanarak motorun emisyon ve performansını tam yük ve farklı devir şartlarında test etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda EMS mekanizması kullanılması durumunda CO emisyonlarında düşüş fakat hidrokarbonlar (HC) ve NO<sub>x</sub> emisyonları artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Güç, tork değerlerinde artış ve özgül yakıt tüketimi değerlerinde ise azalış meydana geldiği gözlemlenmiştir [30]. Geçim ve Raghavan yapmış oldukları çalışmada üç farklı değişken supap aktüatör mekanizması için analitik ve deneysel çalışmalarını sunmuşlardır. Bunlar arasında mekanik bir değişken kaldırma ve süre kavramı, bir hidrolik kayıp hareketi değişken kaldırma sistemi ve valf devre dışı bırakma mekanizması bulunur. Bu farklı yaklaşımların güçlü ve zayıf yönleri tartışılmış ve uygun olan test sonuçlarını sunmuşlardır [31].

Chukwunke ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada EMS mekanizması sisteminin matematiksel modelini geliştirerek sistemin her bir tasarım parametresine etkilerini incelemek için Matlab Simulink yazılımını kullanarak analiz çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda 3,42 ms kapanma süresi ve 0,55 m/s'den 0,16 m/s'e kadar azaltılan supap oturma hızı, pozisyon geri besleme kapalı döngü kontrol Matlab Simulink'de tasarlanmış ve uygulamaya konulmuştur [32]. Rezeko ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada tek bobin ve tek yaydan oluşan EMS mekanizmasının yörünge izleme kontrolünü ele almaktadır. EMS sistemi için dinamik model geliştirilmiş, bulanık çıkarım sistemi ANFIS (uyarlanabilir nöron bulanık çıkarım sistemi) kullanılarak oluşturulmuş ve eğitim veri setleri, tam ifadeli geribildirim ve PID kontrolü kullanılarak önerilen sistemden edinilmiştir. Sonuçlar, supap kalkma, izleme doğruluğu ve oturma hızına göre tamamen DSZ çalıştırılmasının gerçekleştirildiğini gösterdi. Sentezlenen kontrolörün uygulanabilir olduğu, sistemdeki belirsizlikleri sürdürebildiği ve kontrol besleme gerilimi sınır değerini aşmadığını bulmuşlardır [33]. Nikate ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada üç silindirli doğal emişli ve turbo aşırı doldurmalı aynı motor için supap

mekanizması optimizasyonunu AVL-Excite yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyon esnasında önemli olan parametrenin silindir içi basınç değerinin supap mekanizmasına etkisinin olduğunu belirtip ve buna göre değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Optimizasyon sonucu olarak gerilmelerde ve supap mekanizmasının ağırlığında azalma olması durumunda daha az kuvvet gereksinimi oluşmuştur [34]. Stiehl ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada kademeli direk enjeksiyonlu buji ateşlemeli bir motorda iki farklı emme manifoldu geometrisi için parçacık görüntülemeli akış ölçüm cihazı ile silindir içi akış ve yakıt püskürtme-akış etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Kademeli dolgu için motorun sıkıştırma periyodunda üç kademeli geç püskürtme oluşturulmuştur. Birinci enjeksiyondan ziyade ikinci enjeksiyonun, ateşleme esnasında ateşlenebilir karışımlar sağladığı ve yüksek dalgalanmalara maruz kaldığı için ikinci enjeksiyona odaklanarak, emme portunun geometrik varyasyonunun silindir içi akış ve akış-sprey etkileşimleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Akış-sprey etkileşimi konusunda ilk enjeksiyonun etkilenmediği fakat, ikinci enjeksiyonun spreynin şekli üzerinde büyük ölçekli dikey girdabının çevrimden çevrime dalgalanmalarının büyük bir etkisinin olduğunu korelasyon analizi kullanılarak ortaya konmuştur. Emme manifoldu geometrisi değişimine bağlı olarak önemli akış değişikliklerine rağmen ikinci enjeksiyonun dalgalanma seviyeleri her iki geometride de aynı olduğu ve spreynin dalgalanmalarının geometrik değişimlere karşı hassas olmadığını görmüşlerdir [35]. Reinholz ve Seethaler yapmış oldukları çalışmada EMS mekanizması olarak yeni bir tasarım önerisinde bulunmuşlardır. Önerdikleri tasarımda bir DC motor sayesinde supabın hareketi sağlanmakta ve istenilen hız ve profil elde edilebilmektedir. Bu tasarımın ilk önce analizlerini ardından deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişler ve diğer EMS mekanizmalarından daha basit bir yapıda olduğunu ve daha işlevsel bir yapısının bulunduğunu savunmaktadır [36,37].

### **2.3. Analiz Çalışmaları**

Literatür araştırmasında görüldüğü üzere içten yanmalı motor için genellikle yanma ve silindir içi akış analizi çalışmaları yapılmıştır.



Bailly ve diğeri, dört supaplı benzinli bir araştırma motoru için lazer dopler hız ölçüm cihazı kullanarak deneysel olarak hız, yatay girdap, dikey girdap gibi değerleri ölçerek bu ölçümlerin bilgisayar ortamında analiz ile desteklenmesi için bir HAD kodu oluşturmuşlar ve bu HAD kodunu kullanarak soğuk akış analizi yani yanmasız hava akış analizi gerçekleştirmiş ve deneysel sonuçlarla uyumluluğunun iyi derecede olduğunu ortaya koymuşlardır [38]. Johan ve diğeri, tek silindri bir motor için soğuk akış modeli geliştirerek bu geliştirdiği modelin emme, egzoz ve sıkıştırma zamanlarında hareketli ağ yapısı ile düzgün bir şekilde çalışıp çalışmadığını incelemiştir [39]. Schernus ve diğeri, tek silindri benzinli bir motor için EMS mekanizması kullanılması durumunu üç farklı açıdan incelemiştir. İlk olarak Matlab Simulink yazılımıyla elektromekanik sistemde supabın açılması için yayı sıkıştırması gereken kuvvet ve bobinlerdeki gerekli enerjiyi belirlemiştir. İkinci olarak emme ve egzoz manifoldlarındaki akışın geri tepme basıncını düşürmek için manifold geometrisi optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir ve son aşama olarak GT-Power yazılımını kullanarak geri tepme basınç kayıpları ve elektromekanik supabın açık kalma süresini değiştirerek supapların açılması için gerekli kuvvetleri belirlemiştir [40]. Gibson ve Kolmanovsky; kamsız motorların supaplarının bağımsız olarak kontrol edilmesi ile geniş bir motor devri aralığında tork ve yakıt verimliliğinin en üst düzeye çıkarılabileceğini savunmuşlardır. Bu avantajları elde etmek için gereken supap zamanlaması ve çalışma modu değişiklikleri, hava yükü ve yanmış gaz fraksiyonunda potansiyel olarak belirgin kararlı durum ve geçici değişimler oluşturabileceğini savunarak sıfır boyutlu bir yazılım kullanarak sabit ve zamana bağlı olarak emme valfi kapanmasını geciktirerek supap bindirme süresini arttırmış ve EMS profili oluşturarak bu profil sayesinde hava dolgusundaki ve içeride kalan gazlara etkisini incelemişler ve bu konuda daha detaylı çalışma yapılması gerektiğini önermişlerdir [41].

Laramee ve diğeri; içten yanmalı motorlar için iki önemli hava akış parametresi olan yatay girdap ve dikey girdap etkisini hareketsiz durum için HAD yöntemi ile bu parametrelerin görüntüleme tekniği konusunda incele yapmışlardır. 2, 2,5 ve 3 boyutlu akışın görselleştirilmesi hususunda yapılan çalışmalar neticesinde akış çizgileri veya akış konturlarının gösterimi konusunda boyut görsellik olarak ilişkinin

fazla olduğu ve akışın görselleştirilmesi konusunda önemli olduğunu ortaya koymuşlardır [42]. Sridhar ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada pistonlu motorlarda piston üstü geometrisinin düz olması ve çanak şeklinde oyuk olması durumunu 3 boyutlu HAD yazılımı kullanarak yanmasız yani sadece hava akışının olduğu durum için literatürden elde ettikleri deneysel veriler ile kıyaslamışlardır. Türbülans modeli olarak  $k-\epsilon$  türbülans modelini kullanmışlar ve piston ÜÖN'de iken deneysel sonuçlar ile uyumluluğunun olmadığını ortaya koymuşlardır. Bunun nedeninin piston üst ölü noktada iken ölü hacmin etkisi ile içeride oluşan türbülansın  $k-\epsilon$  türbülans modeli ile yakalanamadığı, bu nedenle farklı türbülans modeli kullanmayı önermişlerdir [43]. Garth ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada HAD yazılımlarında önemli olan akış görselleştirme konusunda çalışma yapmışlardır. Silindir içi akış için önemli olan yatay girdap ve dikey girdap değerlerinin görselleştirilmesi hususunda AVL yazılımının da geliştirme sağlamışlardır [44]. Karışım hazırlığının derecesinin kontrolü, yanma prosesi ve genel motor performansının iyileştirmesi için, silindir içi hava akış hareketi en önemli faktörlerden biridir. Mahrous ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada değişken negatif supap bindirmesinin (NSB) homojen dolgulu sıkıştırılmalı ateşlemeli (HCCI) bir motorda Ansys Fluent yazılımını kullanarak yanmasız akış HAD analizi gerçekleştirmişlerdir. Literatürden alınan deneysel veri ile analiz çalışmasının doğruluğunu ispatlayarak devamında NSB 70, 90 ve 110 olması durumlarını incelemişlerdir. Bunun için EmSK ve EgSA zamanları sabit tutulmuş ve EmSA ve EgSK zamanlarını değiştirerek gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçları, NSB'nin büyüklüğünün bir sonucu olarak silindir içindeki hava dolgusunun hareketinin ve yönünün gözle görülür bir şekilde değiştirildiğini göstermektedir [45].

Kurniawan ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada 1,6 litre hacimli dört zamanlı direk enjeksiyonlu bir motorun piston üstü geometrisinin değişmesi durumunu soğuk akış yani yanmasız hava akışını STAR-CD yazılımını kullanarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak piston tepesi oyuğun silindir içi hava akış parametrelerine etkisinin önemli olduğunu ortaya koymuşlardır [46]. Dinler ve Yücel yapmış oldukları çalışmada ideal kabul edilen homojen karışımli buji ateşlemeli bir motoru numerik olarak analiz etmişlerdir. Bujinin yerini tam olarak silindirin

merkezinde bulunduğu kabulü yaparak emme supabının üç farklı açısı için analizler yapmışlardır. Silindirik akışta hızın ve devir sayısının arttığı ve türbülans şiddetinin artması nedeniyle alev yayılımının küçük supap açılarında daha hızlı olduğu bulmuşlardır [47]. Mitianiec ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada buji ateşlemeli turbo aşırı doldurmalı bir motorda sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) kullanımı için deneysel ve analiz çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın ağırlığını analiz çalışması oluşturmakta ve KIVA3V yazılımını kullanmışlardır. Deneysel ve çoğunlukla analiz sonuçlarının sıkıştırılmış doğal gazın tutuşma ve yanma sürecini etkileyen bazı önemli faktörleri olduğunu ortaya koymuştur [48]. Peng ve Jia yapmış oldukları çalışmada EmSK gecikmesinin, ön karışimli sıkıştırma ateşlemeli bir dizel motorda (PCCI) yanma ve emisyon özellikleri üzerine olan etkisini araştırmak için detaylı kimyasal kinetik mekanizması ile tam döngülü üç boyutlu hesaplamalı akışkan dinamikleri (HAD) modeli ile incelemiştir. EmSK gecikmesi uygulanmasının etkin sıkıştırma oranını düşürerek ve ön karışımı arttırarak ateşleme zamanlamasının etkin bir şekilde kontrol edilmesini ve azot oksitlerin ( $NO_x$ ) ve kurum emisyonlarının önemli oranda azaltılmasını sağladığı gösterilmiştir. Ancak düşük yanma sıcaklığı ve yetersiz oksijen miktarı nedeniyle muhtemelen hidrokarbon (HC) ve karbon monoksit (CO) emisyonları artışına neden olmuştur. Dizel PCCI motorlarında emisyon azalması için EmSK gecikme potansiyelini araştırmak için emme basıncını, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) oranı ve enjeksiyon başlangıç zamanlamasını değiştirerek parametrik çalışmalar yapmışlardır. Sonuç olarak, emme basıncının arttırılması yardımıyla eş zamanlı olarak EmSK gecikmesinin,  $NO_x$ , kurum, HC ve CO emisyonlarını azaltabileceğini bulmuşlardır.

Dizel PCCI yanma işlemi için tatmin edici  $NO_x$  ve kurum emisyonlarını sağlamak için belirli bir EGR oranı ve optimize edilmiş enjeksiyon başlangıç zamanlaması her zaman gerekli olduğunu ortaya koymuşlardır [49]. Martins ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada küçük bir içten yanmalı motorda yatay girdap ile oluşan türbülans etkisini araştırmak için Ansys Fluent yazılımını kullanarak farklı supap kalkma miktarları için analizler gerçekleştirmişlerdir [50]. Fengjun ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada HCCI modunu sağlayabilmek için buji ateşlemeli bir motorda elektro-hidrolik supap mekanizması ile dahili EGR uygulamışlardır. HCCI

ve supap mekanizmasının analizini GT-POWER ve CHEMKIN yazılımlarını eşleştirerek yanma analizleri gerçekleştirmişlerdir. En uygun dahili EGR miktarının belirlenmesi ve HCCI yanma modunun en büyük sıkıntısı olan çalışma aralığını genişletmeyi hedeflemişlerdir [51]. Jemni ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada bir otobüs için kullanılan dizel bir motorun emme manifoldu optimizasyonunu FloWorks yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu optimize edilen emme manifoldu geometrisini imal ederek ilk durumdaki ve önerdikleri emme manifoldunun motorun performansına etkilerini ortaya koymuşlardır. Önerdikleri emme manifoldunun güç, tork ve yanma verimliliğini arttırdığı ve yakıt tüketimini azalttığını deneysel olarak ortaya koymuşlardır [52]. Rezai ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada yüksek devirli direkt enjeksiyonlu dizel motorunda silindir içi dolgu hareketinin karışım hazırlama, yanma ve emisyon oluşumu üzerine etkisini HAD yazılımı olan STAR-CD ve KIVA-3V eşleştirerek iki farklı supap kalkma miktarı ve iki farklı türbülans modeli için araştırmayı amaçlamışlardır. Düşük supap kalkma miktarı ve manifold deaktivasyonu ile silindir içi akış yapısında önemli değişikliklere sebep olmakla birlikte yatay girdap seviyesini arttırmaktadır. Türbülans modellerinden LES modelinin ise silindir içi akış ve is oluşumu tahmininde gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır [53].

Bari ve Saad yapmış oldukları çalışmada hava ile yakıtın daha iyi karışması ve yakıt moleküllerinin parçalanmasına yardımcı olmak için türbülans oluşturmak için emme manifoldunun önüne yönlendirme kanadı yatay girdap ve dikey girdap Cihazı takılmasını önermektedir. Bu çalışmada, Ansys CFX yazılımını kullanarak 0,25, 0,5 ve 0,75 yarıçap olmak üzere üç farklı yönlendirme kanadı ve kanatsız durum için analizler gerçekleştirmişlerdir. Burada en iyi türbülansın 0,25 yarıçap boyutundaki yönlendirme kanadı ile elde ederek dizel yakıttan viskozitesi daha yüksek olan biyodizel, daha küçük parçalara ayrılarak yanma verimliliğini yükseltmeyi hedeflemişlerdir [54]. Sushma ve Jagadeesha yapmış oldukları çalışmada Ansys Fluent yazılımını kullanarak direkt enjeksiyonlu dizel bir motorun silindir içi akış modellemesini üç farklı piston tepesi geometrisi ile çalışmışlardır. Analiz sonuçlarında piston tepesi geometrisinin Meksika şapkası diye tabir edilen şekilde olması durumunda içeride oluşan türbülansın ve volümetrik verimin en ideal şekilde

oluşturduğunu ortaya koymuşlardır [55]. Güneş ve Horasan, yapmış olduğu çalışmada çift döngülü yanma odalı dizel motorunun silindir içi akısı incelenmiştir. Yapılan çalışmada emme, yakıt püskürtme, karışım oluşumu ve egzoz aşamalarını yanmasız ve sabit bir devir için incelemiştir. Ansys Fluent yazılımı kullanılarak analiz çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Ağ yapısının uygunluğu teyit edildikten sonra, akış analizi için gerekli parametreler tanımlanmıştır. Analiz tam bir döngü için gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler sonucunda silindir içinde oluşan döngü miktarı açısından incelemiştir [56].

Ansys Fluent yazılımı kullanılarak silindir içi akış modellemesi konusunda birçok çalışma mevcuttur. Analiz sonuçlarında içeride oluşan türbülans kinetik enerji, yatay girdap, dikey girdap vb. değerlerini ortaya koymuşlardır [57-64].

Yapılan literatür araştırması neticesinde, şimdiye kadar yapılmış deneysel çalışmaların EMS mekanizmasının motor üst bloğuna yerleştirilerek motordan bağımsız olarak bu sistemin kontrolü ile ilgili çalışmalar gerçekleştirildiği görülmüştür. Gerçek zamanlı motor testlerini gerçekleştirenlerin ise genellikle sadece emme supabının kontrolünü elektromekanik olarak yapmış olduğu ve egzoz supabının ise klasik kam mekanizması ile kontrolünü sağlayarak deneysel çalışmalar gerçekleştirdikleri görülmüştür. Analiz çalışmalarında ise silindir içi hava akış analizleri yapılmış fakat EMS mekanizması ile yapılan DSZ için herhangi bir çalışma görülememiştir. Bu nedenle literatürdeki bu açığa yönelik bir çalışma yürütülmesi düşünülmüş ve neticede EMS mekanizması ile DSZ konusunda bir çalışma yapılmıştır.

### **BÖLÜM 3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ZAMAN KAVRAMI VE HAVA AKIŞ KONTROL MEKANİZMALARI**

Bu bölümde yapılan çalışma ile ilgili temel kavramların tanıtılması için öncelikle içten yanmalı motorlarda zaman kavramı ve hava akış kontrolünü sağlayan supaplar anlatıldıktan sonra supapların kontrol mekanizmaları konusunda detaylı bilgi verilmiştir.

İçten yanmalı motorlar; karışımın tutuşturulması şekline göre (kıvılcım ateşlemeli, sıkıştırılmalı ateşlemeli), supapların konumuna göre, temel tasarım şekline göre (pistonlu motor, döner pistonlu motor), pistonlu motorlarda silindirlerin sayısı ve yerleştirilmesine göre (tek silindirli, sıra motor, V-motor, boksör motor, W-motor, karşıt pistonlu motor, radyal motor), hava emiş şekline göre (doğal emişli, mekanik aşırı doldurmalı, turbo aşırı doldurmalı, karterden-sıkıştırılmalı motor ), benzinli motorlarda yakıt giriş yöntemine göre (karbüratörlü, çok noktadan yakıt püskürtmeli, tek noktadan yakıt püskürtmeli, direkt benzin püskürtmeli motorlar), dizel motorlarda yakıt giriş yöntemine göre (direkt püskürtmeli, indirekt püskürtmeli, homojen karışımli sıkıştırılmalı ateşlemeli motorlar), kullanılan yakıtı göre (benzin, dizel ya da fuel oil, gaz, alkol ve çift yakıtlı motorlar), soğutma şekline göre (hava soğutmalı ve sıvı (su) soğutmalı) ve motor çevrimine göre sınıflandırılabilirler [65]. Motor çevrimine göre ise iki zamanlı çevrim ve dört zamanlı çevrim olmak üzere iki şekilde incelenirler. Dört zamanlı çevrime sahip motorlarda, motorun bir çevrimi yani döngüyü tamamlaması için pistonun toplam dört kurs boyunca hareket etmesi gerekmektedir.

### 3.1. İçten Yanmalı Motorlarda Zaman Kavramı

İçten yanmalı motorların genel olarak sınıflandırılmasından önceki bölümde bahsedilmiştir. İçten yanmalı motorlar çevrim tipine göre iki zamanlı çevrim ve dört zamanlı çevrim olarak ikiye ayrılır.

**İki Zamanlı Çevrim:** İki zamanlı çevrimli motorlarda bir çevrim iki kursta gerçekleşir. Bu iki kursta, emme ve sıkıştırma bir kursta ve yanma ve egzoz bir kursta yapılır. Sıkıştırma ve yanmanın gerçekleştiği periyotta ise supaplar tamamıyla kapalıdır.

**Dört Zamanlı Çevrim:** Motorun pistonunun alt ölü nokta (AÖN) ve üst ölü nokta (ÜÖN) arasında yapmış olduğu yukarı veya aşağı yönlü hareketin dört kez gerçekleşmesi sonucunda tam bir çevrimin oluşmasıdır. Dört zaman aşağıda açıklanmıştır.

**Emme Zamanı:** Birinci zaman, yakıt hava karışımının veya havanın yanmanın gerçekleşeceği silindire çekildiği zamanı belirtir ve dört zamanlı içten yanmalı motorların çevriminin başlangıcıdır. Bu zamanın başlangıcında motorun pistonu ÜÖN'den AÖN'ye hareket ederek hava veya yakıt-hava karışımı silindir içine emilir. Piston ÜÖN'den aşağı inerken emme supapları açılır bu esnada da egzoz supapları kapalı konumdadır. Hava silindir içine eğer aşırı doldurma yoksa dış ortamdaki atmosferik basınçla pistonun aşağı yönlü hareketi nedeniyle silindir içi basıncın düşmesiyle meydana gelen basınç farkından dolayı içeri dolar.

**İkinci Zaman (Sıkıştırma Zamanı):** İkinci zaman sıkıştırma prosesinin gerçekleştiği zamandır. Piston emme prosesine sonunda AÖN olarak tabir edilen en dip noktaya ulaştığında emme biter. Emme prosesinin bitmesi ile pistonun yukarı yönlü hareketi nedeniyle hacimdeki azalma nedeniyle ve bu esnada egzoz ve emme supaplarının kapalı konumda olması nedeniyle sıkıştırmanın etkisiyle basınç artışı meydana gelir. Benzinli motor eğer direkt enjeksiyonlu bir motor ise sıkıştırılmış havanın üzerine yakıt püskürtülmesiyle ya da karbüratörlü yada ön karışimli ise de havanın emilmesi

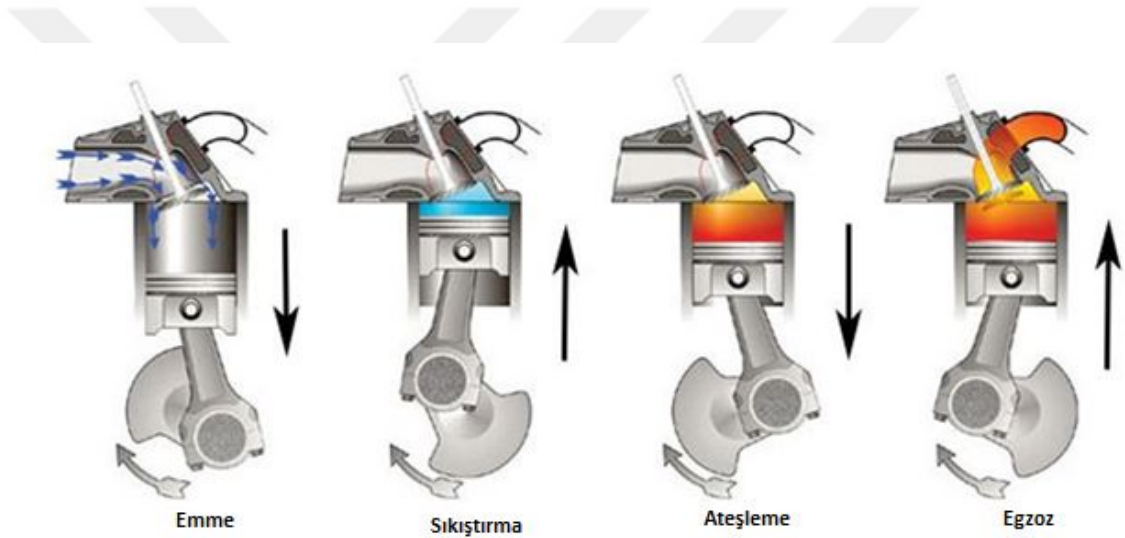
esnasında yakıt-hava karışımı oluşturularak pistonun yukarı yönlü hareketi ile hacmin azalması ile birlikte içerideki karışımın sıcaklık ve basıncı artar. Karışımın tutuşma yada yanma safhasına hazır hale getirildiği zaman olduğu için sıkıştırma zamanı olarak da adlandırılır. Üçüncü zamana geçmeden öncede anlatılacak en önemli durum ise yanmanın bu iki zaman aralığında gerçekleşmesidir. Benzinli motorlarda üst ölü noktaya çok az bir mesafe kala buji yardımıyla ateşleme sağlanmaktadır. Yanma, çok hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, yanmanın ideal şartlarda sabit hacimde gerçekleştiği kabulü yapılmaktadır. Yakıtın kimyasal olarak reaksiyona girerek yanmış gaz ürünlerine dönüşmesi ve bu dönüşüm esnasında açığa çıkan ısı enerjisi ile içerideki sıcaklık ve basınç bu safhada artmaktadır

**Ateşleme-Genişleme Zamanı:** Üçüncü zaman ise ateşleme-genişleme, iş veya güç zamanı olarak adlandırılır. Bu zamanda ise benzinli motorlarda ÜÖN'ye çok yakın bir noktada buji yardımıyla kıvılcım verilmesi ile başlayan yanmanın devam ederek ateşleme-genişleme zamanında içeride yanmanın etkisi ile oluşan basınç ve sıcaklık pistonu aşağı yönlü hareket ettirmektedir. Bu esnada supaplar tamamıyla kapalı konumdadır. Genişleme periyoduna geçilmesi ve bu zamanda yanmış gazların sıcaklığı ve basıncın etkisi ile pistonun AÖN'ye kadar hareket etmesi ile bitmektedir. Bu zamanın sonuna kadar supaplar tamamıyla kapalı durumda iken içerideki yanmış gazların tahliyesi için egzoz supabı AÖN'ya varmadan çok kısa bir süre önce açılmaktadır. Bu açılmanın en temel sebebi içeride artık gaz kalmasını önlemektir. İçerideki basıncın atmosfer basıncından büyük olması nedeniyle egzoz supabının açılmasının etkisi ile yanmış gazlar dışarı atılmaya başlar. Bu sürece egzoz gazlarının kendiliğinden silindir dışına genişlemesi (exhaust blowdown) olayı denmektedir.

**Egzoz Zamanı:** Dördüncü zaman ise egzoz zamanı olarak adlandırılmaktadır. İçten yanmalı motorlarda egzoz zamanı ise genel olarak 3 fazdan oluşur. Bu üç faz egzoz gazı genişlemesi, süpürme ve supap bindirmesidir. Egzoz gazı genişlemesi egzoz supabının pistonun AÖN'ya ulaşmadan açılması ile pistonun AÖN'ya ulaşması arasında geçen süre içerisinde yanma sonu gazlarının silindir içerisindeki basıncının dış atmosfer ortamından fazla olması nedeniyle kendi kendine yanma odası hacmini



terk ettiği fazdır. İkinci faz ise süpürme fazıdır. Piston AÖN'ye geldiğinde egzoz gazı genişlemesi süreci bitmiş ve artık pistonun ÜÖN'ye doğru hareketi sonucu silindir içindeki yanmış gazları yukarı yönlü süpürmesi ile yanmış gazların silindir içini terk etmesidir. Üçüncü faz ise supap bindirmesidir. Egzoz supabının kapanmasına çok yakın bir zamanda emme supabının açılması ile içerdeki yanmış gazların yerine taze hava alarak, bu gazların dışarı atılması sağlanmış olur. Böylelikle piston ÜÖN'ya vardığında tam bir çevrim yani  $720^\circ$  KMA tamamlanmış olmakta ve döngü bu şekilde devam etmektedir. Bu dört zaman  $720^\circ$  KMA'da gerçekleşir. Şekil 3.1.'de dört zamanlı bir motora ait emme, sıkıştırma, ateşleme- genişleme ve egzoz zamanları gösterilmiştir [13].



Şekil 3.1. Dört zamanlı motorun zaman kavramları [66]

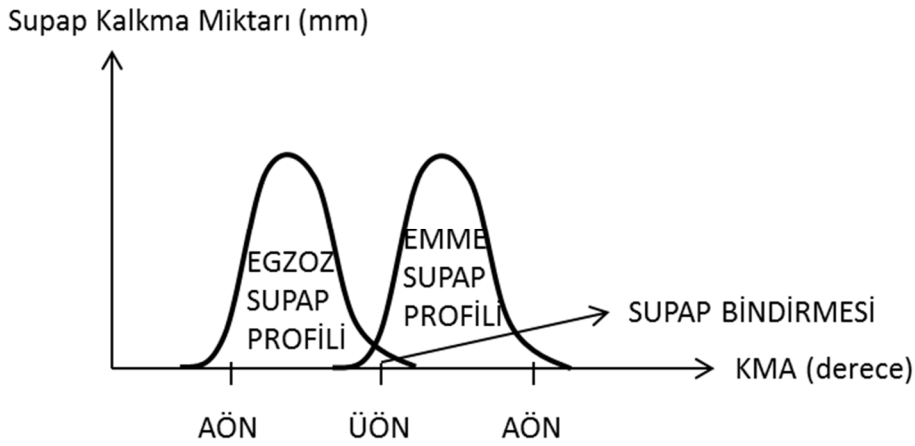
Yukarıda detaylı olarak bahsedilen dört zamanın kontrolü supaplar vasıtasıyla yapılmaktadır. İdeal çevrime göre; bu dört zamanın AÖN ve ÜÖN 'larda supabın ani bir şekilde açıldığı varsayılarak gerçekleşmektedir. Gerçekte ise bu şekilde olmamaktadır.

### 3.2. İçten Yanmalı Motorlarda Supap Zamanlaması

Genel olarak dört zamanlı içten yanmalı motorlarda kam mili ile tahrik edilen mantar tipi supaplar kullanılmaktadır. Hareketini krank miline bağlı triger kayışından alan

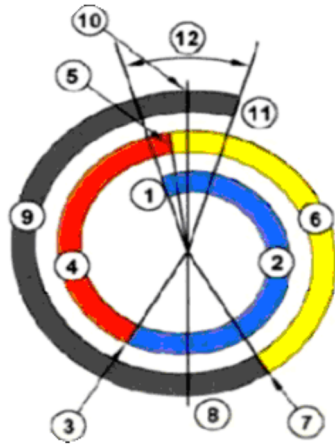
kam mili vasıtasıyla supaplar açılıp kapanmaktadır. Dört zamanın gerçekleşmesi için krank milinin konumunu belirleyen sensör ile supapların açılıp kapanma zamanları tayin edilmektedir.

Bu sensör sayesinde motorun AÖN ve ÜÖN noktaları belirlenmekte ve supap zamanlamaları oluşturulmaktadır. Supapların ideal şartlarda pistonun ÜÖN'de iken aniden tamamıyla açıldığı kabulü yapıldığından bir önceki bölümde bahsedilmiştir.



Şekil 3.2. Emme ve egzoz supap hareket profilleri

Fakat gerçek çevrimde ya da içten yanmalı motor uygulamalarında sinüs eğrisi şeklinde olan supap iticisi nedeniyle supabın tamamıyla açılması emme zamanının tam ortasına denk gelmektedir. Yani supapların tamamıyla açılması ve kapanması için belirli süreler geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle özellikle yüksek devirlerde emme ve egzoz zamanlamalarında yeterli temiz hava alımı veya yeterli oranda yanmış gazların tahliyesi sağlanamamaktadır. Şekil 3.2.'de supapların hareket profilleri gösterilmiştir.



- 1-) Emme Supabı Açılması (EmSA)
- 2-) Emme Zamanı
- 3-) Emme Supabı Kapanması (EmSK)
- 4-) Sıkıştırma Zamanı
- 5-) Ateşleme Avansı
- 6-) Genişleme Zamanı
- 7-) Egzoz Supabının Açılması (EgSA)
- 8-) Alt Ölü Nokta
- 9-) Egzoz Zamanı
- 10-) Üst Ölü Nokta
- 11-) Egzoz Supabının Kapanması (EgSK)
- 12-) Supap Bindirmesi

Şekil 3.3. Supap Zaman Ayar Diyagramı [67]

Şekil 3.3.'de ise kam profiline bağlı supap zaman ayar diyagramı görülmektedir. Supap zaman ayar diyagramı incelendiğinde emme prosesinin gerçekleşmesi için emme supabının ÜÖN'den önce açıldığı ve AÖN'den sonra kapandığı görülmektedir. Egzoz supabının ise erken açılıp geç kapandığı diyagramdan anlaşılmakta ve buna avans denmektedir Bunun nedenleri aşağıda detayları ile açıklanmıştır.

Emme prosesi yapılırken dolgudaki kısılma miktarını azaltıp volümetrik verimin artırılmasını sağlamak için, emme supabı erken açılıp geç kapanmaktadır. Bu sayede emme için daha fazla süre sağlanmış olur.

Emme supabının erken açılması: emme supabının ÜÖN'den önce açılması ile egzoz gazlarının egzoz manifoldu yerine emme manifolduna yönelerek yakıt hava karışımı veya havanın ısıtılması ve dahili EGR sağlanabilmektedir. Bu sayede karışıma ön ısıtma uygulaması gerekmemekte yanmayı daha da iyileştirmektedir. Diğer yandan bu erken açılmanın çok artırılması durumunda supap bindirmesi süresi artmakta ve içeri taze dolgu alınması engellenerek yanma kötüleşmektedir. Bu nedenle emme açılma zamanının optimize edilmesi gerekmektedir.

Emme supabının kapanma gecikmesi: emme supabının kapanma zamanı ise herhangi bir devirde motorun volümetrik verimini, motorun performansını ve yakıt ekonomisini doğrudan etkileyen bir parametredir. Emme supabının kapanmasının

maksimum tork için içeri en yüksek miktarda havanın alınabileceği optimum bir kapanma zamanında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Devir arttıkça emme supabının kapanmasının AÖN'dan ileriye doğru kayması maksimum hava alımı için gerekmektedir [68].

Egzoz prosesi yapılırken silindir içinde kalan yanmış gazların daha fazla dışarı atılması ve içeri alınacak taze dolguya daha fazla yer açılması için egzoz supabı erken açılmaktadır. Silindir içine alınacak taze dolguyu ısıtma veya yanma verimliliğini arttırmak adına da geç kapanmaktadır. Bu sayede egzoz için daha fazla süre sağlanmış olur.

Egzoz supabının erken açılması: silindir içi yanmanın gerçekleşmesiyle supaplar kapalı konumda iken genişleme periyodunun sonuna doğru iç basıncın atmosfer basıncından yüksek olması ve bu basıncın eğer supap AÖN'den önce açılmaması durumunda pistonu negatif iş yükleyeceğinden dolayı ve silindir hacminin çok iyi temizlenebilmesi için zamanın arttırılması gerektiği için yapılmaktadır. Egzoz supabının açılma zamanı efektif genişleme oranını belirlediğinden dolayı, çevrimin verimini etkilemektedir [13, 69].

Egzoz supabının geç kapanması: egzoz supabının kapanma zamanı ise supap bindirmesinde önemli rol almaktadır. Egzoz supabının ÜÖN'den sonra kapanması ve emme supabının erken açılması sonucu supap bindirmesi oluşmaktadır. Bu sırada bir miktar egzoz gazları silindir içinde kalır ya da emme manifolduna yönelir. Egzoz supap zamanlaması ile içeride bir miktar egzoz gazının kalması olayına dahili EGR denir. Egzoz gazlarının alınıp soğutularak ya da soğutmadan emme manifolduna doğrudan veren sisteme ise harici EGR denir. Motorun tam yükte çalışması esnasında, silindirde mümkün olan en az miktarda egzoz gazının tutulması istenir. Çünkü bu emme kursu esnasında maksimum taze hava ve yakıt hacminin girmesini sağlar. Kısmi yüklerde ise EGR'nin az tutulması pompalama kayıplarını azaltmak için kullanılabilir. Fakat EGR'nin arttırılması içeriye daha az taze dolgu alınmasına neden olacaktır. Bunun yanında EGR miktarının arttırılması ile yanma kötüleşecek ve yanma verimliliği düşecektir.

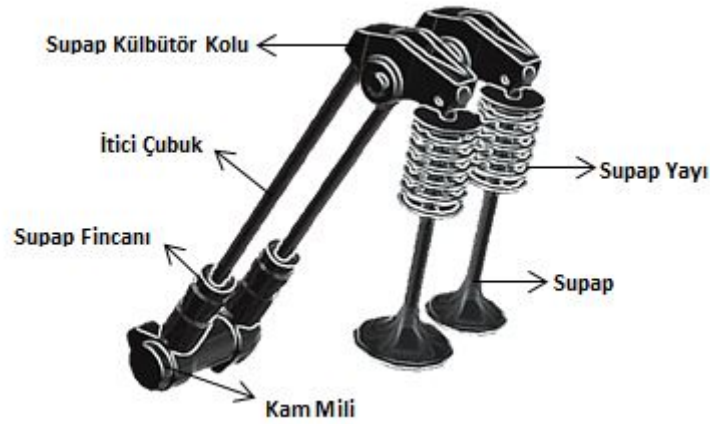
Supap bindirmesi: Egzoz zamanı sonunda emme zamanı başlangıcında Pistonun, ÜÖN’de bulunduğu sırada, emme ve egzoz supaplarının birlikte açık buldukları zaman aralığı supap bindirmesi olarak adlandırılmaktadır. Bunun yanında egzoz supabı kapandığında emme supabının açılmamış olması durumuna ise negatif supap bindirmesi (NSB) olarak adlandırılır. Supap bindirmesi yalnızca kısmi yük ve orta devirlerde faydalı olmaktadır. Yüksek yük ve devirlerde istenilen güç ve torkun elde edilememesine neden olmaktadır. Supap bindirmesi; emme supabının açılması ile egzoz gazlarının dışarı tahliyesi artmaktadır. Silindir içi basıncın düşmesi ile de emme manifoldundan havanın emilmesinin daha iyi gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Aynı zamanda emme supabının açılması ile yanma odası soğutulmakta ve bir sonraki çevrimin emme süreci başlamaktadır [7, 68].

### **3.3. İçten Yanmalı Motorlarda Supap Kontrol Mekanizmaları**

İçten yanmalı motorlarda dört zamanın gerçekleşebilmesi supap kontrol mekanizmaları sayesinde oluşmaktadır. Yanma olayının kontrolü supaplar ile sağlanabilmektedir. Supap kontrol mekanizmaları ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki kamlı supap kontrol mekanizması ve ikincisi ise kamsız supap kontrol mekanizmalarıdır. Bunlar ile ilgili detaylı bilgi alt başlıklarda verilmiştir.

#### **3.3.1. Kamlı supap kontrol mekanizmaları**

Geleneksel motorlarda supapların açılıp-kapanma kontrolü krank miline bir kayış sistemi ile bağlı kam mili vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Bu sistemde kam mili üzerindeki profil sayesinde supabın açılıp-kapanma ve kalkma miktarları motorun en ideal şartlarına göre ayarlanmakta ve bu şartlarda çalışmaktadır. Kam milinin supapları hareket ettirmesi neticesinde motor içerisine alınacak olan hava veya hava-yakıt karışımının zamanlaması, sıkıştırma periyodu sonunda gerçekleşen yanma sonucu açığa çıkan egzoz gazlarının silindir içinden dışarı tahliyesi sağlamaktadır. Supapların hareketi için farklı kam tasarımları mevcuttur. Kam mili altta bulunan ve itici çubuk ve külbütör mekanizması ile supaba hareketi ileten bir kam mili mekanizması Şekil 3.4.’de görülmektedir.



Şekil 3.4. Klasik kam mekanizması [70]

İçten yanmalı motorlarda genellikle kullanılan kamlı supap mekanizmalarında motorun en iyi çalıştığı verim aralığındaki optimum supap zamanlaması seçilerek kam mili imalatı yapılır ve motorun tavsiye edilen çalışma aralığında kullanılması durumunda optimum verim elde edileceği bilinmektedir. Teknolojinin gelişmesi ile motorların performansları konusunda çalışmalar ilerlemiştir.

Eğer supap zamanlaması krank mili açısından (KMA) bağımsız ve farklı yük koşulları için uyarlanabilir şekilde ayarlanabilirse; motor performansı herhangi bir motor çalışma aralığında daha yüksek tork/güç çıkışı, arttırılmış menzil ve emisyonların azaltılması ile ilgili olarak optimize edilebilir. Bu esnek kontrollü supap zamanlamasına değişken supap zamanlaması (DSZ) denir ve ilgili supap tahrik sistemine değişken supap hareketi denir. DSZ daha iyi motor performansına dönük gelişimi destekleyen en umut verici yeni teknolojilerden biridir [71-73].

İçten yanmalı motor konusunda yapılan araştırmalarda; DSZ'nin yaklaşık % 5-20 yakıt ekonomisi iyileştirmesi, % 5-13 tork değerinde iyileşme, % 5 ila% 10 hidrokarbon (HC) emisyon azaltımı ve % 40 ~ 60 arasında NO<sub>x</sub> emisyon azaltımı sağladığı görülmüştür [16,74,75,76].

DSZ'nin mekanik olarak sağlanması konusunda birçok motor üretici firma çalışma yapmıştır. Bu çalışmalar genel olarak supap zamanlamasını kaydıran, supap kalkma miktarını değiştiren ve her ikisini de yapabilen kam mekanizmaları konusundadır. Bu

sayede motor her devir de optimum verim vermesi sağlanmıştır. Supapların motordan bağımsız çalışması ise sınırsız supap zamanlaması anlamına geldiği için verimi daha çok arttıracığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle kam milinin tamamıyla iptal edilip kamsız motor teknolojisine yönelik çalışmalar artmıştır. Kamsız supap mekanizmaları ise çalışma prensipleri benzer olmakla birlikte 3 ayrı şekilde sınıflandırılabilmektedir. Bir sonraki başlıkta detaylı olarak anlatılmıştır.

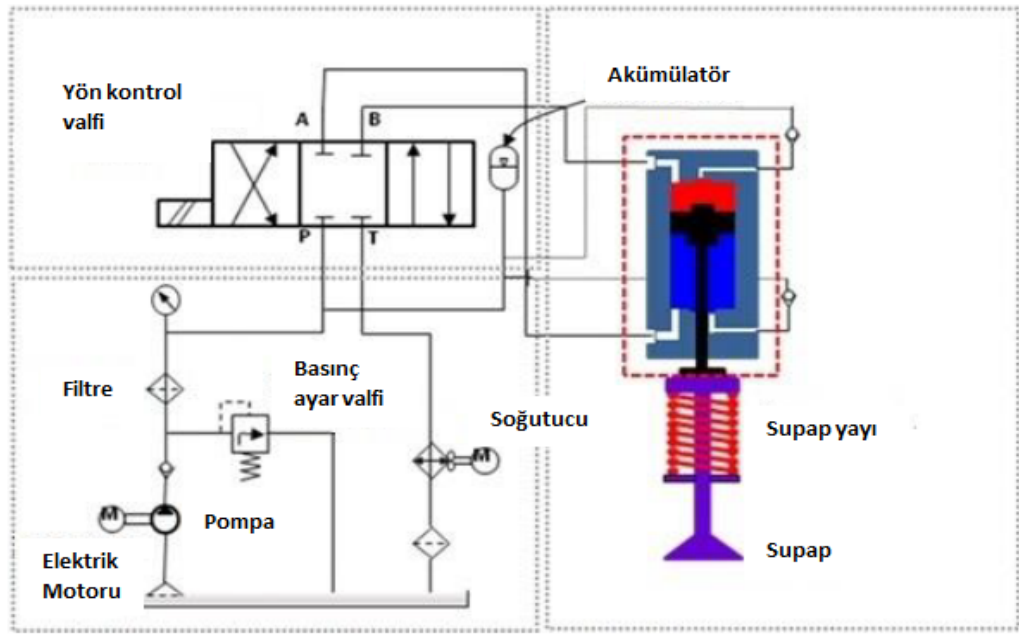
### 3.3.2. Kamsız supap kontrol mekanizmaları

Otomotiv endüstrisindeki sürekli olan gelişmeler nedeniyle motorda kam mili olması durumunda meydana gelen sürtünme kayıpları, kamsız motor teknolojisi ile çözülebilir. Kam milinin çıkarılması ile tamamıyla elektronik kontrollü yöntemlerle yani mekatronik olarak supapların açılıp kapanmasının mümkün olduğu görülmüş ve bu alanda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar özellikle kamsız supap sistemlerinin tasarımının üç farklı kontrol sistemi ile kontrol edilebileceğini göstermiş [73] ve bunlar;

- a. Elektro-pnömatik supap sistemi
- b. Elektro-hidrolik supap sistemi
- c. Elektromekanik supap sistemi

olarak sınıflandırılmıştır. Burada bu üç farklı sistemin çalışma prensibi ile ilgili açıklamalarda bulunulacaktır.

- a. Elektro-pnömatik supap mekanizması şematik çalışma prensibi gösterimi Şekil 3.5.'de görülmektedir. Burada görüldüğü üzere elektrik motoru ile pompa çalıştırılmakta hava basınçlandırması yapılmakta ardından supapın aşağı veya yukarı yönlü hareketinin belirlenmesi için yön kontrol valfi ve supabın üst kısmında bulunan pistonun hareketi ile supabın kontrolü sağlanmaktadır.

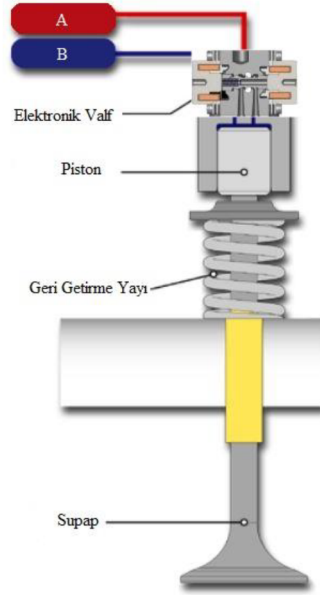


Şekil 3.5. Elektro-pnömatik supap mekanizması çalışma prensibi [77]

Avantaj olarak bakıldığında bu sistem sınırsız bir supap zamanlaması sağlayabilmektedir. Fakat çok fazla eleman barındırması ve üzerinde kompresör bulunması nedeniyle araçlarda kullanılması zor olduğu düşünülmektedir.

b. Elektro-hidrolik supap mekanizması ise elektro-pnömatik supap mekanizmalarına çalışma prensibi olarak benzemektedir. Aralarındaki tek fark ise pnömatik sistemlerde basınçlı hava kullanılması hidrolik sistemlerde ise basınçlı sıvı kullanılmasıdır [9].

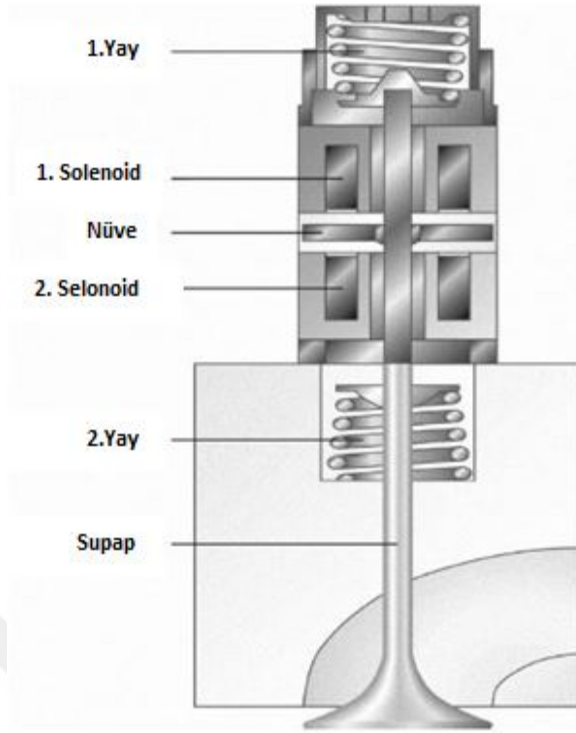




Şekil 3.6. Elektro-hidrolik supap mekanizması çalışma prensibi [78].

Elektronik bir valf yardımıyla basınçlı olan akışkan A kanalından hazneye doğru hareket eder. Akışkanın basıncı supap yayının kuvvetini yendiği anda supap açılır. Supabın kapanması için elektronik valfin enerjisi kesilir. Basınçlı olan akışkan B kanalından geri akmaya başlar ve supap yayı ters yönde hareket ederek supabın kapanmasını sağlar [79]. Pnömatik sistemden daha fazla kuvvet üretebilmekte olduğu için egzoz supabının açılması daha kolaydır. Daha az alan kaplamakta ama yine de otomobil sınıfındaki araçların motor bölmesindeki alanlar kısıtlı olduğu için kullanılabilirliği zayıftır.

c. Elektromekanik supap mekanizmalarının içten yanmalı motorlarda kullanımı ise çalışma prensibi olarak aynı olmakla birlikte farklı tasarım ve tipleri mevcuttur. Şu anda en gelişmiş solenoid aktüatör kullanan EMS sistemi genellikle 2 adet bobin devresi, 2 adet yay ve bir nüveden oluşmaktadır [23]. Bunun dışında elektrik akımını verecek akım kontrol cihazı, sensörler ve kontrol ünitesi bu sistemin temel elemanlarıdır. Şekil 3.6.'da EMS mekanizmasının kısımları gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Elektromekanik supap mekanizması [80]

İki mıknatıs solenoid arasında bulunan nüvenin gidip gelme hareketi sayesinde nüvenin de direkt olarak supaba bağlı olması nedeniyle supap açma-kapama hareketi gerçekleşmektedir. Hareketli nüve normal şartlarda supabın açma-kapanma hareketi mesafesinin tam ortasında konumlandırılır. Mıknatıslanma etkisi ile nüve aşağı ya da yukarı yönlü hareket ederek supap tam açık pozisyonda yada tam kapalı pozisyona geçer. Yaylar ise mıknatıslanmanın etkisi ile supabı ters yönde hareket ettirmek için üzerinde potansiyel enerji toplar. Şekil 3.7.'de görüldüğü üzere 1. solenoide gerilim uygulanması sonucu nüveyi manyetik alan kuvveti etkisi ile çekmesi durumunda supap kapalı pozisyona gelmekte ve gerilimin kesilmesi ve yayda biriken potansiyel enerjinin etkisi ile tekrar orta konuma geçmektedir. 2. solenoide gerilim uygulanması durumunda manyetik alan kuvvetinin etkisi sonucu nüvenin aşağı yönlü hareketi ve nüveye bağlı supabın ise tam açık pozisyona ulaşması ve bu şekilde supabın açılıp-kapanma hareketini sağlamaktadır. Bu sistem kam mili mekanizmasına göre tamamıyla bağımsız olması nedeniyle motorun alt ve üst devirlerinde de optimum volümetrik verim sağlama özelliği bulunmaktadır. Volümetrik verimin iyileşmesi

neticesinde yanma verimliliği ve motorun genel veriminde artışlar meydana getireceği açıktır.

Bu kadar avantajına rağmen dezavantajları da bulunmaktadır. En önemlisi bu sistemde supabın orta noktaya gelmesi için yayın sertliğidir. Yayın sertliğinin çok olması daha fazla kuvvet gereksinimine ihtiyaç duyulmasına, daha az olması istenilen geri tepme hızının sağlanamaması durumuna sebep olacaktır. Bir diğer önemli husus ise EMS sisteminde supabın oturma hızının yüksek olması durumunda mekanik aşınma, gürültü ve yorulma meydana gelmekte bu nedenle oturma hızının belirli bir seviyenin altında olması gerekir. Kontrol ünitelerinde bunun için metot geliştirilerek optimum değerlerde tutulmaya çalışılmaktadır.

EMS'lerde sistemin sürekli aynı istikrarda çalışma problemleri aşırı ısınma veya gerilim dengesizliği vs. gibi durumlardan dolayı oluşabilmektedir. Bu konulardaki çalışmalarla birlikte aynı zamanda kontrol ünitesi ve sistemde tüketilen enerjinin minimum seviyeye indirilmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir.

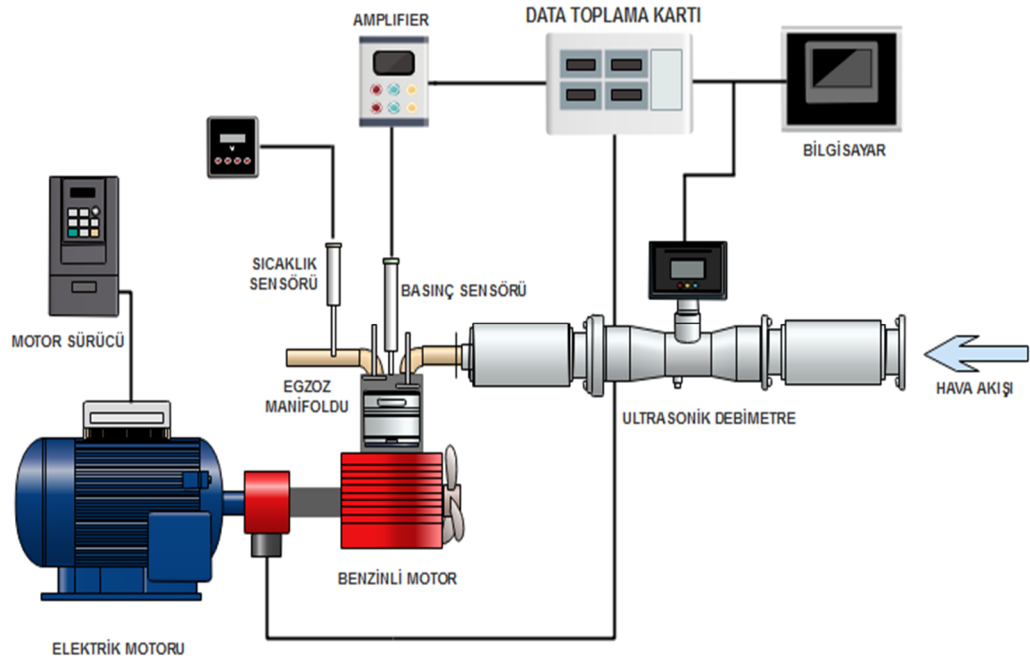
## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, buji ateşlemeli bir motorun konvansiyonel kam mili ile kütleli hava debisi ve silindir içi basınç değerleri ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan sonra parametrik çalışma olarak HAD yazılımı ile deneysel çalışmanın doğrulaması yapılmıştır. Bu bölümde, deney düzeneği, kullanılan alet, teçhizatlar, ölçüm yöntemleri ve deney ölçümlerinin belirsizliği hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

Deneysel çalışma da deney düzeneğinin kurulması ve deney verilerinin toplanması amaçlanmıştır. Deney düzeneğinin kurulması aşamasında, öncelikle içten yanmalı tek silindirli buji ateşlemeli bir motor ile elektrik motor bağlantısı gerçekleştirilmiş, sürücü ile elektrik motorunun döngüsel hareketinin kontrolü ve test parametrelerini içeren değerlerde çalıştırılması sağlanmıştır. Sehpaya alınan motorun emme hattı üzerine, ultrasonik debimetre, nem, sıcaklık ve basınçölçer montajı yapılarak ölçüm aletlerinin kalibrasyonu ve test ölçümleri yapılmış ve sistem deneyler için hazır hale getirilmiştir.

Çalışmada kullanılan deney sisteminin bileşenleri; dört zamanlı-tek silindirli buji ateşlemeli bir motor, elektrik motoru, elektrik motoru sürücüsü, , enkoder, silindir içi basınç sensörü ve üst ölü nokta (ÜÖN) sensörü ve hava akış debisi ölçerden oluşmaktadır. Deney düzeneğinin prensip şeması Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.

Deney düzeneğinde kullanılan tek silindirli benzinli motorun tahriki için, bir elektrik motoru kaplin yardımıyla motora bağlanmış ve sistem test sehpasına sabitlenmiştir. Krank açısı bilgisi için motorun krank mili çıkışına bir enkoder takılmıştır. Bununla birlikte, bir kontrol mekanizması olarak ÜÖN sensörü kalibrasyonu yapılarak elektrik motoru ve buji ateşlemeli motor bağlantı noktasına irtibatlandırılmıştır.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin prensip şeması

Deneyisel çalışmada Honda GX 390 marka dört zamanlı-tek silindirli bir benzinli motor kullanılmıştır. Test motoruna ait teknik özellikler Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Test motorunun teknik özellikleri

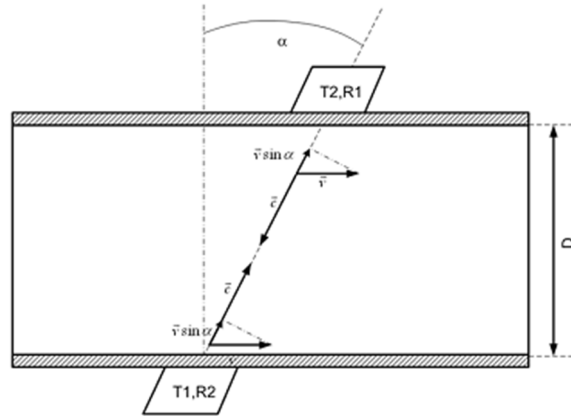
Motor tipi	4 zamanlı-buji ateşlemeli
Silindir hacmi	389 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma oranı	8,0:1
Çap x Strok	88 x 64 mm
Maksimum güç	13 BG @ 3600 RPM
Maksimum tork	2,7kgm @ 2500 RPM
Soğutma sistemi	Hava soğutmalı
Emme Supabı Açılması (EmSA)	0 <sup>0</sup> ÜÖNS
Emme Supabı Kapanması (EmSK)	40 <sup>0</sup> AÖNS
Egzoz Supabının Açılması (EgSA)	45 <sup>0</sup> AÖNÖ
Egzoz Supabının Kapanması (EgSK)	5 <sup>0</sup> ÜÖNS

Test motoruna hareket vermek için GAMAK marka elektrik motoru kullanılmıştır. Elektrik motorunu sürmek için ise 11 kW'lık ABB marka motor sürücüsü kullanılmıştır. Elektrik motorunun teknik özellikleri Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Elektrik motorunun teknik özellikleri

Giriş gerilimi	380 V
Frekans	50 Hz
Hız	3000 rpm
Güç	7,5 kW

Ultrasonik debimetrenin ölçüm prensibi; ultrasonik geçiş süresi diferansiyel yöntemini esas almaktadır. Ultrasonik debimetrenin içinde birbirine karşılıklı monte edilmiş vericiler ( $T_1$ ,  $T_2$ ) ve alıcılar ( $R_1$ ,  $R_2$ ) vardır. Bu alıcılar karşılıklı olarak birbirlerine ultrasonik sinyaller göndermektedir. Borudaki sıvının akış yönüne gönderilen sinyal ile akış yönüne karşı gönderilen sinyalin alıcılara ulaşma süresi farklılık gösterir. Akış yönüne ( $v$ ) gönderilen sinyal daha çabuk giderken ( $R_1$  alıcısına ulaşan sinyal) aksi istikamete gönderilen sinyalin alıcılara ulaşması ( $R_2$  alıcısına ulaşan sinyal) daha uzun süre alır.



Şekil 4.2. Ultrasonik debimetrenin yapısı

$T_1$  den  $R_1$  e hareket eden sinyal için geçen zaman;

$$t_{up} = \frac{D}{\sin \alpha} * \frac{1}{(c+v*\cos \alpha)} \quad (4.1)$$

$T_2$  den  $R_2$ 'ye hareket eden sinyal için geçen zaman;

$$t_{down} = \frac{D}{\sin\alpha} * \frac{1}{(c-v*\cos\alpha)} \quad (4.2)$$

2 sinyal arasındaki zamansal fark;

$$\Delta t = t_{down} - t_{up} = v * \frac{t_{down}*t_{up}*\sin(2\alpha)}{D} \quad (4.3)$$

$$v = \frac{D}{\sin(2\alpha)} * \frac{t_{down}-t_{up}}{t_{down}*t_{up}} \quad (4.4)$$

Ortalama akış hızından debi ( $\dot{v}_a$ ), ( $\dot{m}_a$ ) hesaplanır;

$$\dot{v}_a = v * A = v * \pi * \frac{D^2}{4} \quad (4.5)$$

$$\dot{v}_a = \frac{\pi*D^3}{4*\sin(2\alpha)} * \frac{t_{down}-t_{up}}{t_{down}*t_{up}} \quad (4.6)$$

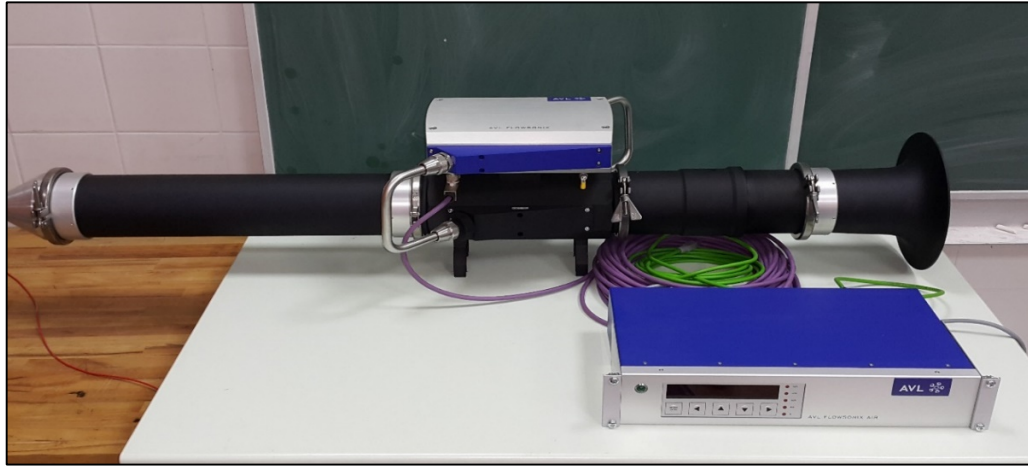
$$\dot{m}_a = \frac{P_a}{RT_a} * \dot{v}_a \quad (4.7)$$

Bunlara ek olarak ultrasonik sinyal hızı şu şekilde belirlenir;

$$\sum t = t_{down} + t_{up} = \frac{1}{c} * \frac{2*D}{\sin\alpha} \quad , \quad c = \frac{2*D}{\sin\alpha} * \frac{1}{t_{down}+t_{up}} \quad (4.8)$$

Aradaki bu zamansal fark matematiksel bir formül ile cihaz tarafından hesaplanır ve cihaz ile hava akış debisi ölçülmüş olur. Şekil 4.2.'de ultrasonik debimetrenin yapısı gösterilmiştir [81].

Ultrasonik debimetre, motorun emme manifolduna uygun şekilde montajı yapılmış ve silindir içine alınan hava miktarı belirli devirlerde ölçülmüştür. Şekil 4.3.'de deney düzeneğine yerleştirilmiş olan hava kütle ölçer (AVL Flowsonic 100) gösterilmiştir. Ölçümlerde AVL cihazına ait olan yazılım ara yüzü kullanılarak veriler elde edilmiştir. Testler yapılırken hava kütlesi debi ölçümü için her bir devirde 180 sn. boyunca ölçüm alınmıştır.



Şekil 4.3 Ultrasonik Debimetre

Deney düzeneğinde ölçülen kütleli hava debisine göre volümetrik verim hesabı için;

$$\eta_{\text{volümetrik verim}} = \frac{\dot{m}_{\text{deneysel}}}{\rho_{\text{hava}} \cdot V_h \cdot n \cdot i \cdot z} \quad (4.9)$$

formülü kullanılmaktadır. Bu formülün pay kısmında deneysel olarak ölçülen kütleli hava debisi ve payda kısmında teorik kütleli hava debisi vardır. Bu oran bize volümetrik verimi vermektedir. Bu ifadenin payda kısmında sırasıyla; havanın yoğunluğu, silindir hacmi, motorun hızı, çevrim oranı ve silindir sayısı yer almaktadır. Volümetrik verimin hesaplanabilmesi için bu değerlerin bilinmesi gerekmektedir. Ultrasonik debimetre ile havanın yoğunluğu ve kütleli hava debisi ölçümleri yapılmaktadır. Motor hızının ölçümü için dijital takometre kullanılmaktadır.

Tablo 4.3. Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerin doğruluk-belirsizlik değerleri

Ölçüm parametreleri	Ölçüm Cihazı	Aralık	Doğruluk Hassasiyeti
$\dot{m}_{\text{deneysel}}$	Kütleli hava Debisi	0-1400 kg/sa	$\pm \% 1,42$
$\rho_{\text{hava}}$	Havanın yoğunluğu	300-1200 hPa	$\pm 3$
$n_{\text{motor hızı}}$	Motor Hızı	1000-10000 RPM	$\pm \%0,005$



Volümetrik verimin hesabında, belirsizlik analizi yönteminin uygulanması için denklemden yer alan ifadelerden hangilerinin ölçüldüğüne ve ölçüm aletlerinin hassasiyet değerlerine bakılması gerekmektedir. Tablo 4.3.'de ölçüm aletleri ve bunların belirsizlik değerleri verilmiştir. Burada motor hızı, kütleli hava debisi ve havanın yoğunluğu ölçülmektedir. Belirsizlik analizi için Mc Clintock metodu kullanılmaktadır. Kısmi diferansiyel yöntem olarak da bilinen belirsizlik analizinde 3 adet bağımsız değişken mevcuttur;

Toplam belirsizlik oranı  $W_n$  şu şekilde ifade edilir:

$$W_n = \pm \left[ \left( \frac{\partial n_v \cdot \text{verim}}{\partial \dot{m}_{\text{deneysel}}} W_{\dot{m}_{\text{deneysel}}} \right)^2 + \left( \frac{\partial n_v \cdot \text{verim}}{\partial \rho_{\text{hava}}} W_{\rho_{\text{hava}}} \right)^2 + \left( \frac{\partial n_v \cdot \text{verim}}{\partial n_{\text{motor hızı}}} W_{n_{\text{motor hızı}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

denklemin 4.2.'deki tüm değerler yerine yazılırsa eğer;

$$W_n = \pm \left[ \left( \frac{\partial n_v \cdot \text{verim}}{\partial \dot{m}_{\text{deneysel}}} W_{\dot{m}_{\text{deneysel}}} \right)^2 + \left( \frac{\partial n_v \cdot \text{verim}}{\partial \rho_{\text{hava}}} W_{\rho_{\text{hava}}} \right)^2 + \left( \frac{\partial n_v \cdot \text{verim}}{\partial n_{\text{motor hızı}}} W_{n_{\text{motor hızı}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (4.11)$$

Sonuç olarak toplam belirsizlik aşağıdaki gibi bulunur. Deneysel sonuçlardaki tüm ölçümlerin ortalamasına göre belirsizlik hesaplandığı zaman

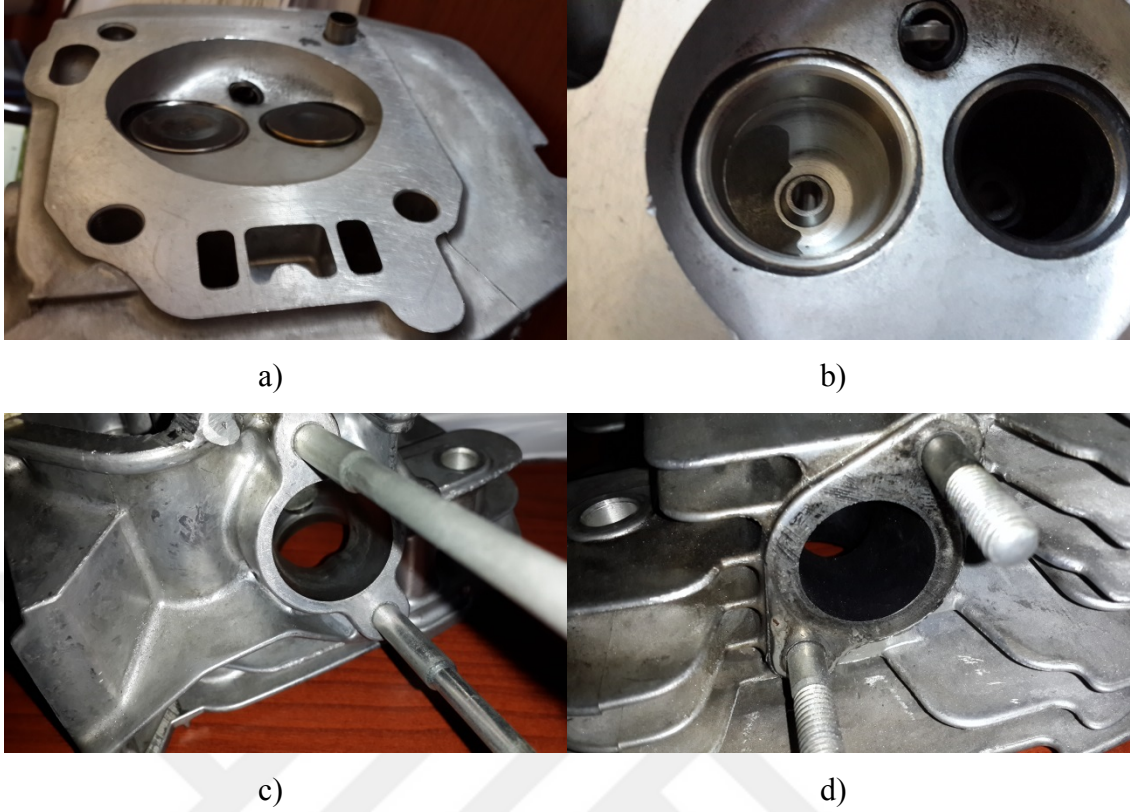
$$W_n = \pm \%0,245 \quad (4.12)$$

Bu değere bakıldığında ise deneysel sistemin toplam belirsizliğinin düşük olduğu anlaşılmaktadır. Sonuçların hassasiyetinin de iyi derece de olduğu görülmüştür.

## **BÖLÜM 5. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE MODELLEME**

Bu bölümde yapılan analiz çalışmasından bahsedilerek analiz oluşturma aşamaları ve analizden elde edilen sonuçların ne anlam ifade ettiği açıklanmıştır. Analiz sonuçlarının deneysel çalışma ile doğrulandıktan sonra parametrik olarak yapılan analiz çalışmasının hazırlanma aşamaları ve girdi parametrelerinden bahsedilecektir.

Analiz çalışması için HAD tabanlı üç boyutlu simülasyon yazılımı olan ve içten yanmalı motorlarda akış ve yanma analizi yapılabilen Ansys ticari yazılımı kullanılmıştır. HAD yöntemi ile 3 boyutlu akış analizi yapılacak olan motorun modelinin oluşturulması için silindir, emme ve egzoz manifoldu iç geometrileri, supap hareket profilleri gibi çok hassas ve detaylı bilgi gerektiren parametrelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Modelleme çalışmasında kullanılacak bu parametreler deneysel olarak kurulumu yapılacak motor düzeneğinden elde edilmiştir. Deneysel çalışmada Honda GX-390 serisi jeneratör tipi buji ateşlemeli motor kullanılmıştır. Deneysel motorun üst kapağı Şekil 5.1.'de görülmektedir. Şekil 5.1.a'da emme ve egzoz supaplarının oturduğu silindir çatısı görülürken Şekil 5.1.b'de ise supap kanallarının görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.1.c ve Şekil 5.1.d'deki resimlerde ise sırasıyla egzoz ve emme manifoldu girişleri görülmektedir. Ticari bir yazılım kullanarak yapılan HAD analizlerinde portlar ve silindir içi hacim arasındaki hava akışı simüle edilecektir. Yapılması planlanan HAD analizleri için motorun üst bloğundaki emme manifoldu, egzoz manifoldu ve supapların da dahil olduğu silindir iç hacminin modelleneceği bir CAD modeli oluşturulması gerekmektedir.



Şekil 5.1. Motor üst bloğunun fotoğrafları

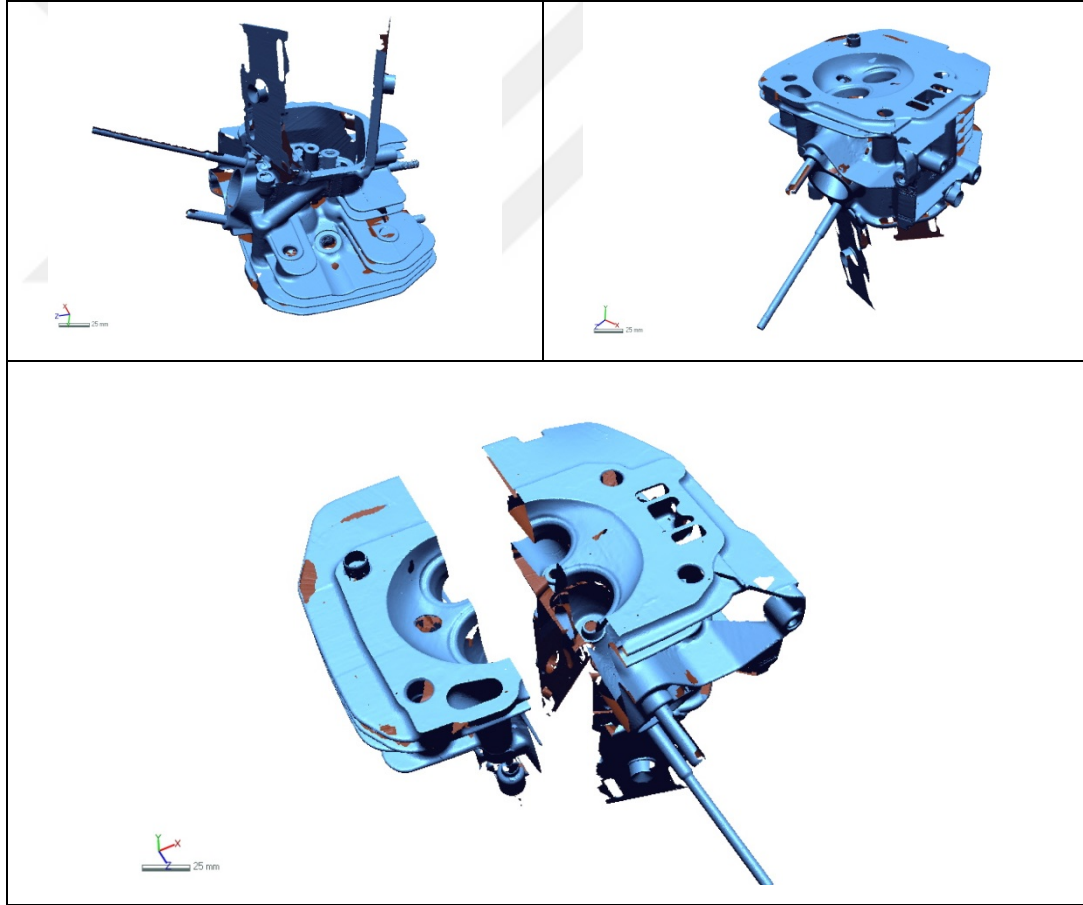
### 5.1. Motor Silindir Hacmi ve Manifoldların 3 Boyutlu CAD Modelinin Oluşturulması

Deney çalışmasında kullanılacak olan Honda GX-390 serisi motorun 3 boyutlu modelini oluşturabilmek için gereken detaylı teknik resimlerine ulaşamamıştır. Bu sebeple atıl durumdaki silindir üst kapağı ve piston kullanılarak HAD analizleri için gerekli olan 3 boyutlu modellerin hazırlanması planlanmıştır. Fakat Şekil 5.1.'de verilen resimlerden anlaşılacağı üzere silindir çatısı geometrisi ve manifold kanallarının 3 boyutlu katı modellerinin kumpas, mikrometre vs. gibi ölçüm cihazlarıyla yardımıyla hatasız bir şekilde çizilmesi oldukça zordur. Yapılacak HAD analizleri neticesinde elde edilecek sonuçlara geometriden kaynaklı hava hareketlerinin azımsanmayacak miktarda etkisi olacağı bilinmektedir. CAD modelinin olabilecek en hatasız şekilde elde edilebilmek ve 3 boyutlu modellemeden kaynaklanacak çözüm hatalarını en aza indirmek için motor üst bloğu geometrisi lazer tarama yöntemi kullanılarak model elde edilmiştir. Lazer tarama yöntemi ile

ürün, parça, montaj, kalıp, fikstür ve benzeri numuneler malzeme ayrımı olmadan 37 µm (mikron) hassasiyet ile ölçülendirme yapılabilmektedir.

Lazer tarama yöntemi ile formlu yüzeylerin ölçüleri çıkartılmakta ve özel bir yazılımla bu ölçülerin bilgisayar ortamına nokta bulutu ve poligon (STL) formatında aktarılması sağlanmaktadır.

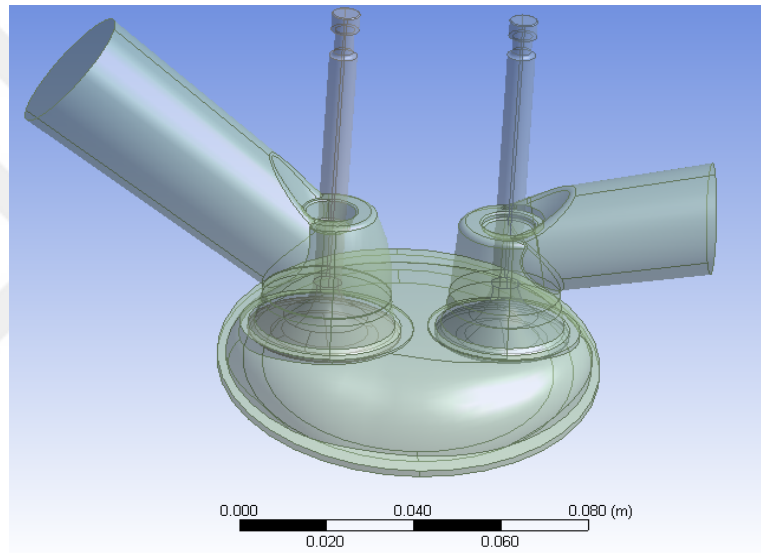
Bütünleşik tek bir parçadan (motor üst geometrisi) alınan nokta bulutu yazılıma aktarılmış ve birkaç özel işlem kullanılarak STL formatındaki CAD modeli oluşturulmuştur. Şekil 5.2.'de STL formatından katı modele dönüştürülmüş motor üst bloğunun görülmektedir.



Şekil 5.2. Tarama sonucu motor üst bloğunun CAD modeli

CAD modellemede ana yüzeyler, federler ve radyuslar gruplanarak katı ve yüzey modellemeye başlanmış ve böylece motor üst bloğunun genel geometrik özelliklerine

sadık kalınarak analize uygun bir tasarım oluşturulmuştur. Yapılacak HAD analizlerinde manifold ve silindir içi hava akışı modellenecektir. Bu sebeple sadece hava hareketlerinin gerçekleştiği bölgelerin CAD modelinin elde edilmesi gerekmektedir. HAD analizleri için gerekli olan akış hacimleri lazer tarama yöntemi ile elde edilen model üzerinde hacim doldurma yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Hava akışının gerçekleştiği manifold ve silindir içi alanların CAD modeli Şekil 5.3.'de görülmektedir. İleriki başlıklarda detaylarının verileceği HAD yazılımındaki özel bir algoritmanın otomatik olarak yapacağı bir işlem için 3 boyutlu modelde emme ve egzoz valfleri silinmeden bırakılmıştır.



Şekil 5.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği için gerekli model

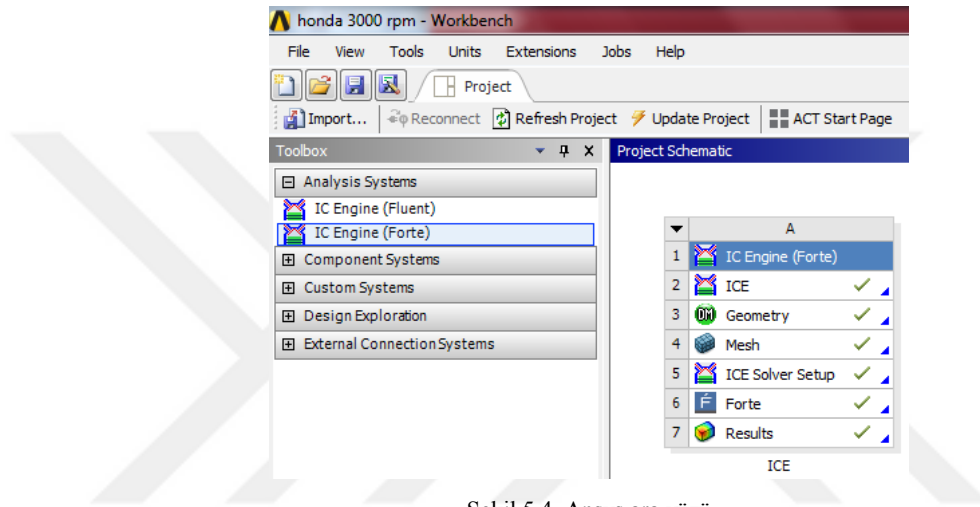
## 5.2. HAD Analizi İçin Gerekli Düzenlemelerin Yapılması

HAD analizi için motor geometrisi üzerinde dinamik ağ yapısının sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi gereklidir. Bunun için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. HAD yazılımı sayesinde silindirin ve supapların aşağı yukarı hareketi için gerekli olan oldukça karmaşık ve zahmetli hacim bölme işlemleri ve bu hacimlerin ve onlara bağlı olan yüzeylerin isimlendirme işlemleri otomatik olarak yapılabilmektedir. Hacimlere bölme ve isimlendirme işlemlerinin ardından ağ yapısını önceden belirlenen kriterler çerçevesinde yine otomatik olarak oluşturmak mümkündür. Ağ

yapısı oluşturulan model çözüm işlemi için HAD yazılımına aktarılır. Çözümün ardından sonuçlar HAD yazılımından alınmıştır.

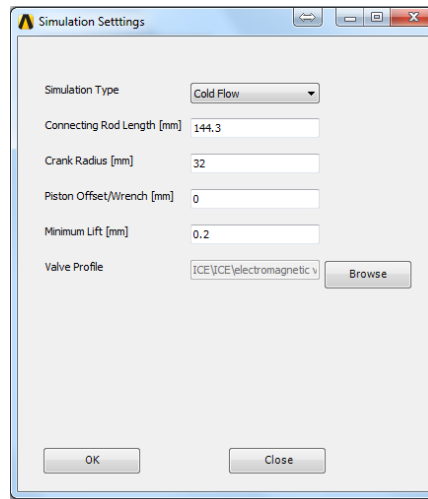
### 5.2.1. Motor parametrelerinin belirlenmesi

İY motor eklentisinde her adımda yapılması gereken işlemler Şekil 5.4.'de Ansys Workbench ara yüzünde görülmektedir.



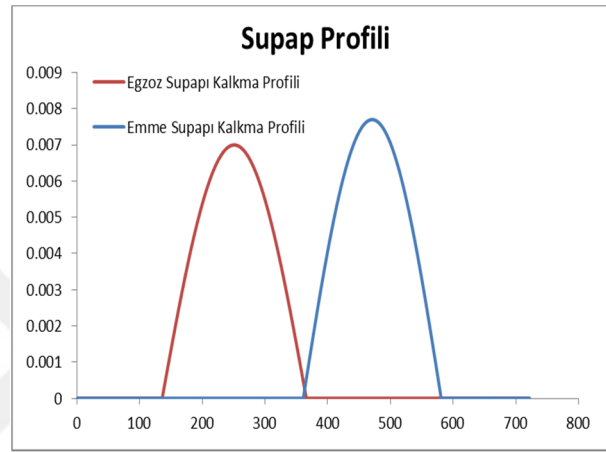
Şekil 5.4. Ansys ara yüzü

Şekil 5.5.'de İY Motor kısmı görülmektedir. Burada; biyel kolu uzunluğu, krank çapı, supabın açılması için minimum kalkma yüksekliği modele girilebilmekte ve ayrıca supap hareketi için hazırlanacak bir profil dosyası da yüklenebilmektedir.



Şekil 5.5. Deneysel motor ile ilgili parametrelerin girildiği kısım

Supap hareketleri için normal kam mili kullanılması durumunda emme ve egzoz supapları Şekil 5.6.'da verildiği gibi sinüzoidal bir eğri şeklinde açılıp kapanma hareketi yaparlar. Bu eğri silindir içine emilen ve dışarı atılan hava miktarı ve silindir içerisindeki türbülans hareketlerini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden yapılacak HAD analizlerinde kullanılacak supap hareket profili deneysel çalışmadan elde edilecek verilerle oluşturulmuştur.

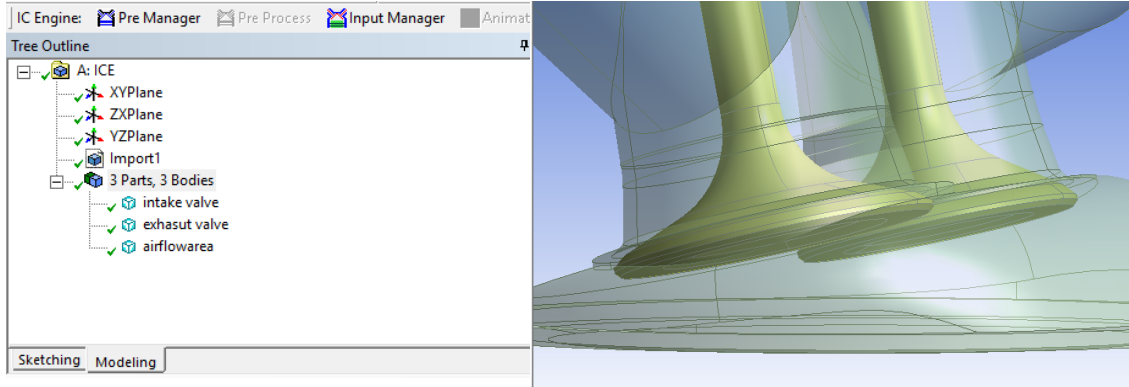


Şekil 5.6. Klasik Kam Mili Profiline bağlı Supap Kalkma Yüksekliği

Klasik supap için profil oluşturulacak ve ardından kam mili iptal edilerek yerine EMS mekanizması yerleştirileceği için kam profili yerine açılıp kapanma zamanları ve manyetik kuvvete bağlı tepkime süresine göre supapların kalkma profilleri belirlenmiştir. Bu profiller ise supapların tepkime süresine göre belirlenerek yeni bir supap kalkma profili oluşturulmuştur.

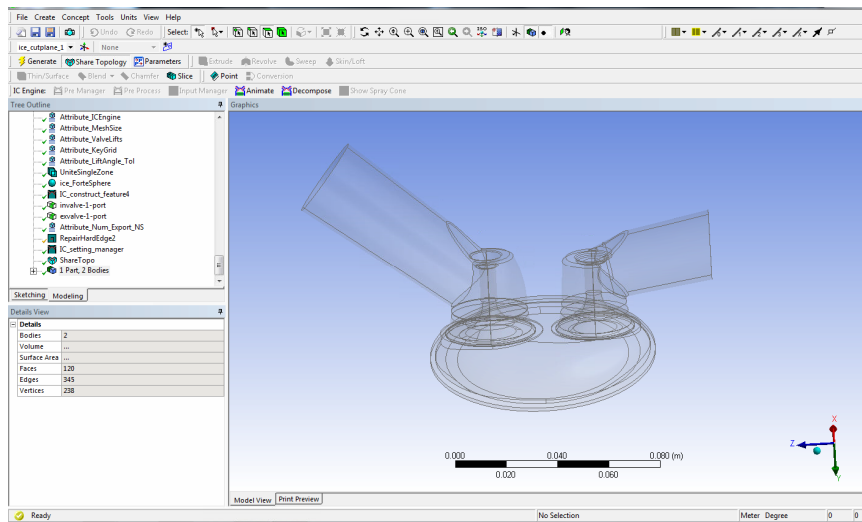
### 5.2.2. Hacimlere ayırma ve isimlendirme işlemlerinin yapılması

HAD analizi için hazırlanan 3 boyutlu model Ansys yazılımına aktarılmıştır. Burada önemli olan yazılıma CAD modelinin yüzey model olarak değil de tamamen bir katı model olarak aktarılmasıdır. Ayrıca model 3 parçadan ve 3 ana gövdeden oluşması gerekmektedir. Şekil 5.7.'de görüldüğü gibi katı model oluşturulurken montaj esnasında ilişkilendirme yapılarak bu işlem gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.7. Modelin içeri aktarılması ve montaj esnasında dikkat edilmesi gereken husus

Katı model yazılıma aktarıldıktan sonra supaplar ve supapların oturma yüzeyleri tanımlanmış ve silindir yüzeyi seçilmiştir. Bu işlemden sonra ağ yapısının oluşturulabilmesi için parçalara ayırma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu sayede her bölgeye ayrı ayrı isim verilerek ve bölgelere ayırarak ağ yapısının oluşturulması kısmına hazır hale getirilmiş olunur. Ardından otomatik ağ yapısı eklentisi sayesinde ağ işlemi için yüzey isimlendirilmesi ve her bölgeye farklı ağ yapısı atılması gerekliliği ortadan kalkmış olmaktadır. Parçalara ayırma işlemi gerçekleştikten sonra Şekil 5.8.'de görüldüğü gibi hava akış hacmi farklı bölgelere ayrılmıştır. Burada bu işlem önemli olan bölgelerde daha sık ağ yapısı oluşturmak ve hareketli ağ yapısı için dörtgensel ağ yapısının hatasız oluşturulabilmesi için her bölgeye farklı isimler vermek ve hacimsel olarak parçalara bölünerek de ağ yapısının oluşturulmasına hazır hale getirmek için oldukça önemlidir.



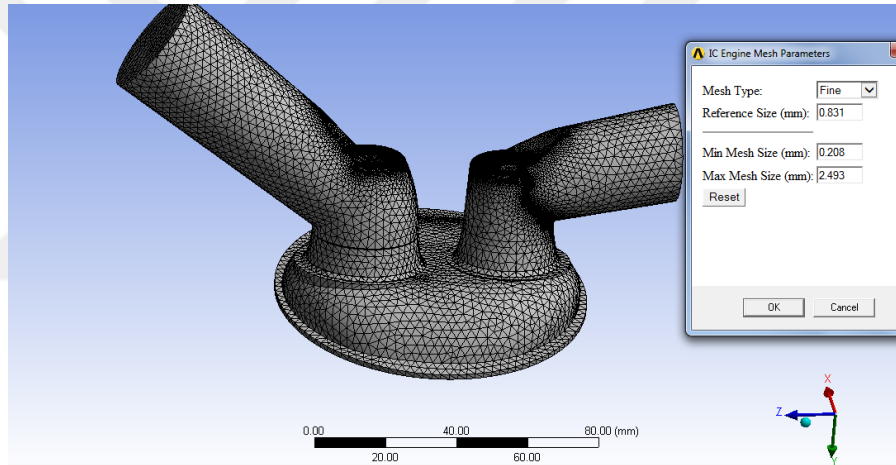
Şekil 5.8. Parçalara ayırma işlemi gerçekleştikten sonraki geometrinin görünümü



Hareketli ağ yapısı işleminin düzgün bir şekilde gerçekleşebilmesi için özellikle silindirik içi hacim ve supapların oturma yüzeyleri çok daha fazla bölgelere ayrılarak oluşturulmaktadır. Bu analizde 3 farklı hareketli ağ yapısı olduğu için ağ yapısının oluşturulması işleminin doğru bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir.

### 5.2.3. Ağ yapısının oluşturulması

Bu adımdan sonra ağ yapısı kısmında otomatik ağ oluşturulması için geometriye ve çözümün hassasiyetine göre en küçük ve en büyük ağ büyüklüğü, ağ tipi ve referans büyüklüğü değerleri ile parametre ayarları yapılır ve böylece istenen özellikte ağ yapısı oluşturulması için gerekli bilgiler yazılıma girilmiştir.



Şekil 5.9. Ağ yapısı parametrelerinin ayarlanması

Şekil 5.9.'da ağ yapısının hassas bir şekilde oluşturulması için gerekli parametreler içten yanmalı ağ parametreleri kısmından girilerek ağ yapısının oluşturulması sağlanmıştır.

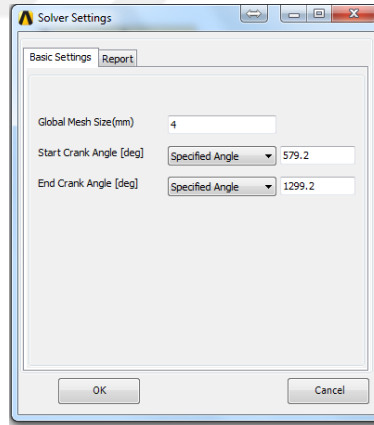
HAD analizlerinde en fazla dikkat edilmesi gereken şeylerden biri de ağ yapısı modelidir. Ağ yapısı ne kadar düzenli ve çok sayıda olursa yapılan analiz de o kadar sağlıklı ve güvenilir olmaktadır. Elbette çözüm süresi çok önemli bir faktördür ve bu yüzden oluşturulacak ağ yapısının analizin olabildiğince yakınsamasını sağlayacak ölçüde yeterli, çözüm süresini de en aza indirgeyecek kadar az olması sağlanmalıdır. Yapılan analiz zamana bağlı çözümlerden oluşmaktadır. Zamana bağlı ve dinamik ağ

yapısı kullanılarak yapılan analizler toplam çözüm süresini çok büyük boyutlara taşımaktadır. Bu aşama için detaylı ağ yapısı optimizasyonu gerçekleştirilmiş olup ileriki bölümlerde yer alacaktır.

#### 5.2.4. Ağ yapısı ayarları

Pistonun üst ölü noktada iken ki durumda modelin ağ yapısı oluşturulmuştu, fakat bu durumda analizlerin hata vermesi nedeniyle ağ yapısı değiştirilerek emme supabının kapanma zamanından yani 580 KMA'dan itibaren analizler başlatılmış ve bu nedenle tam bir döngünün tamamlanma zamanı 1300 KMA'da oluşmuştur. Analiz sonuçları incelenirken bu zamanlar dikkate alınmıştır.

Şekil 5.10.'da global ağ boyutu ve analizin başlangıç ve bitiş zamanlaması bilgileri görülmektedir. Ağ yapısının oluşturulmasının ardından motor için başlangıç ve bitiş zamanları ve bütün analiz süresince geçerli olan genel bir ağ yapısı boyutu tanımlaması yapılmıştır.



Şekil 5.10. Genel ağ yapısı boyutu ve Analiz Başlangıç-Bitiş Zamanlaması

Kullanılan HAD yazılımın diğer yazılımlara göre bir artışı ise her bir çözüm adımında gerekli minimum ağ yapısını kullanarak çözüm yapmasıdır. Diğer yazılımlarda ise başlangıç anında belirlen ağ sayısına göre dinamik harekette pistonun konumuna göre hacimdeki ağ sayıları artıp azalmaktadır. Kullanılan HAD yazılımında ise adaptif ağ yapısı yenileme metodu sayesinde her bir krank açısındaki, önceden tanımlanan parametrelere göre; akış hız, türbülans yoğunluğu, sıcaklık,

basınç gibi, lokal olarak ağ sayısını belirler ve çözümü bu şekilde gerçekleştirir. Bu sayede diğer yazılımlara göre az sayıda ağ yapısı kullanması nedeniyle çözüm hızı oldukça yüksektir. Diğer yazılımlarla günlerce süren analizler adaptif ağ yapısı yenileme metodu ile saatler mertebesine indirebilmektedir.

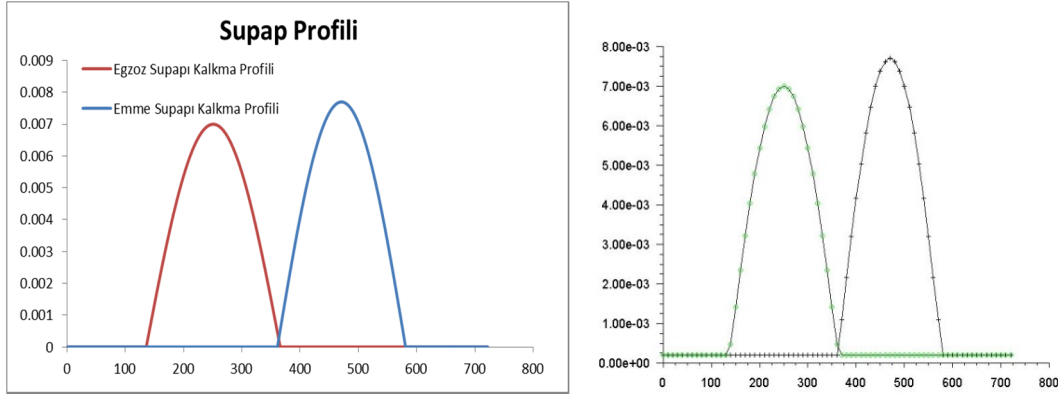
### 5.2.5. Supap profili oluşturulması

Supapların açılma kapanma ve kalkma yükseklikleri tespit edilmiştir. Emme supabı üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) açılma avansı bulunmamakta, yani piston tam üst noktada iken emme supabı açılmaya başlamaktadır. AÖN'den 40 KMA sonra (AÖNS) kapanmaktadır. Egzoz supabı ise AÖN'den 45 KMA önce açılmakta (AÖNÖ) ve ÜÖNS'den 5 KMA sonra kapanmaktadır. Standart bir kam profili Matlab yazılımı ile oluşturulmuştur. Motorun standart supap zamanlaması ve supap kalkma yüksekliği Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Motorun standart supap zamanlaması ve maksimum supap kalkma yüksekliği

	AÇILMA (°)		KAPANMA (°)		SUPAP KALKMA (mm)
EMME	ÜÖNS	0	AÖNS	40	7,7
EGZOZ	AÖNÖ	45	ÜÖNS	5	7

Bu zamanlamaya göre emme ve egzoz supabı hareket profilleri için denklem çıkartılarak supap hareket eğrileri oluşturulmuştur. Ardından HAD yazılımının supap zamanlamasına uyarlanarak grafik haline dönüştürülmüş ve Şekil 5.11.'de görülmektedir. HAD yazılımında supap hareketlerinin 0-720 KMA arasında gerçekleşmesi planlanmıştır. Zamanlama olarak ise deneysel motorun standart kam zamanlamasına göre emme supabının açılması 360 KMA kapanma zamanı ise 580 KMA ve egzoz supabının açılması 135 KMA kapanma zamanı ise 355 KMA olarak tanımlanmıştır.

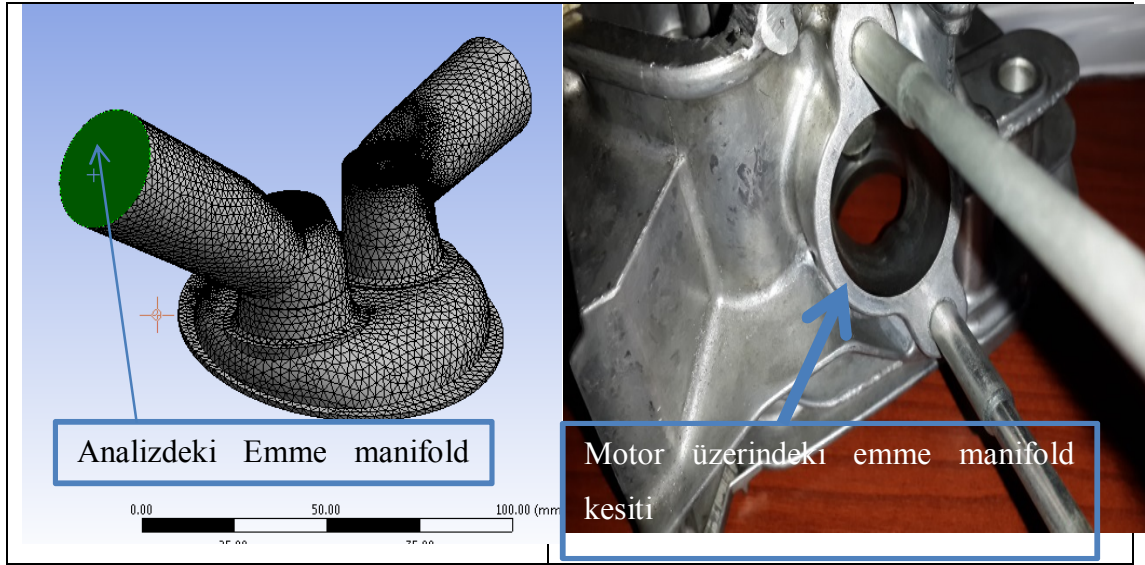


Şekil 5.11. Motorun standart zamanlaması için HAD yazılımına göre supap profili

Profilin motorun supap zamanlamasına uygun olduğu görülmüştür. HAD yazılımına bu profilin aktarılıp, emme ve egzoz supaplarının dinamik hareketinin çalıştırılabilmesi için prof uzantılı bir dosya gerekmektedir. Bu dosya Şekil 5.11.'deki hareket profilinin denklemi sayesinde, her bir krank açısı için kalkma yüksekliğine bağlı olarak oluşturulmuştur.

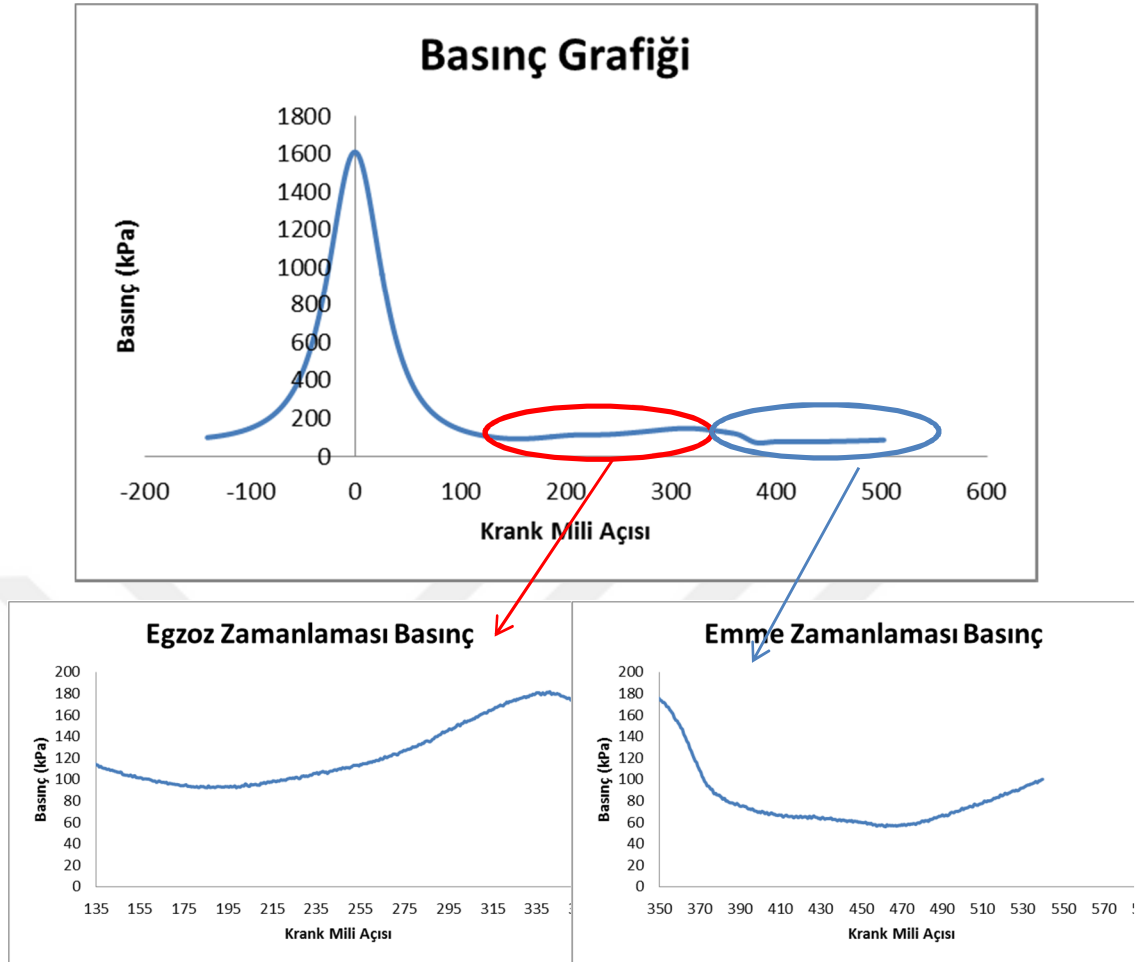
### 5.3. Sınır Şartlarının Belirlenmesi ve Yazılıma Aktarılması

Deneysel çalışmada olduğu gibi analiz çalışmasında da 1600-3000 devir aralığı için 200 devir aralıklara analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler 1 tam döngü olan 720 krank açısı için gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için gerekli olan krank açısına bağlı basınç ölçüm değerleri deneysel ortamda elde edilmiş ve analizlerin doğrulanması için kullanılmıştır. Aynı zamanda hava debisi ölçümleri, emme manifoldun da standart kam profili için gerçekleştirilmiş aynı durum analiz ortamında da incelenmiştir. Analiz çalışmasında kütleli hava debisi hesaplamaları yapılırken geometrinin emme manifoldu giriş kesiti seçilmiştir. Şekil 5.12.'de emme manifoldu hava giriş kesiti gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Deneysel ve Analiz ortamında emme manifoldu kesitleri

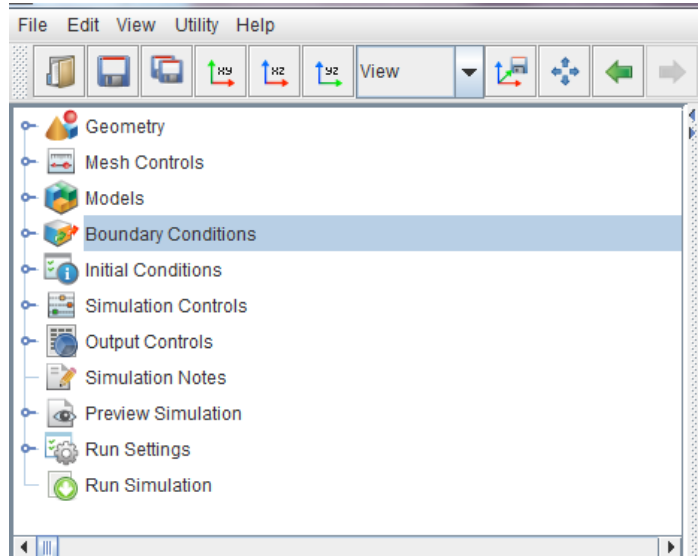
Emme manifoldu hava giriş kesitinden geçen havanın hız vektörlerine, kesitin ölçülerine ve havanın yoğunluğuna göre analiz içerisinde tanımlı olan her zaman adımında ölçümler olarak kayıt edilmektedir. Alınan bu ölçümlerin ortalaması ise havanın kütleli akış debisini vermektedir.



Şekil 5.13. Emme ve egzoz süreci basınç değişimi grafikleri

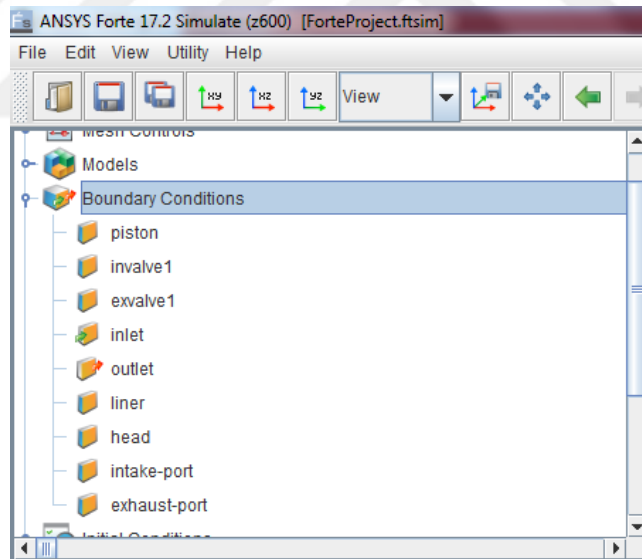
Analizlerin doğru bir şekilde sonuç vermesi için emme ve egzoz manifoldunda sıcaklık ve basınç değerlerinin ölçümünün yapılması gerekmektedir. Şekil 5.13.'de görüldüğü üzere silindir içi basınç grafiğinin sıkıştırma periyodu sonrasında kalan kısmında yer alan basınç değerlerinin emme manifoldu ve egzoz manifoldu için ölçülecek basınç değerlerine çok yakın olduğu kabulü yapılmıştır. Sıcaklıklar ise emme ve egzoz manifoldlarına bağlanan termokupllar ile anlık olarak ölçülmüştür.

Basınç dataları ise krank açısına bağlı basınç verilerinden emme ve egzoz işlemlerinde ki silindir içi en düşük basınç değeri seçilerek analizde gerekli olan giriş (emme manifoldu) ve çıkış (egzoz manifoldu) basınç değerler seçilmiştir. HAD yazılımının ara yüz görseli Şekil 5.14.'de görülmektedir. Seçilen bu değerler HAD yazılımının ara yüzünde bulunan başlangıç koşulları kısmında girilmiştir.



Şekil 5.14. HAD yazılımı ara yüzü

Ağ yapısı ve yüzey isimlendirmesi sonucu yüzey koşulları 9 farklı bölgeye ayrılmıştır.



Şekil 5.15. Sınır koşulları

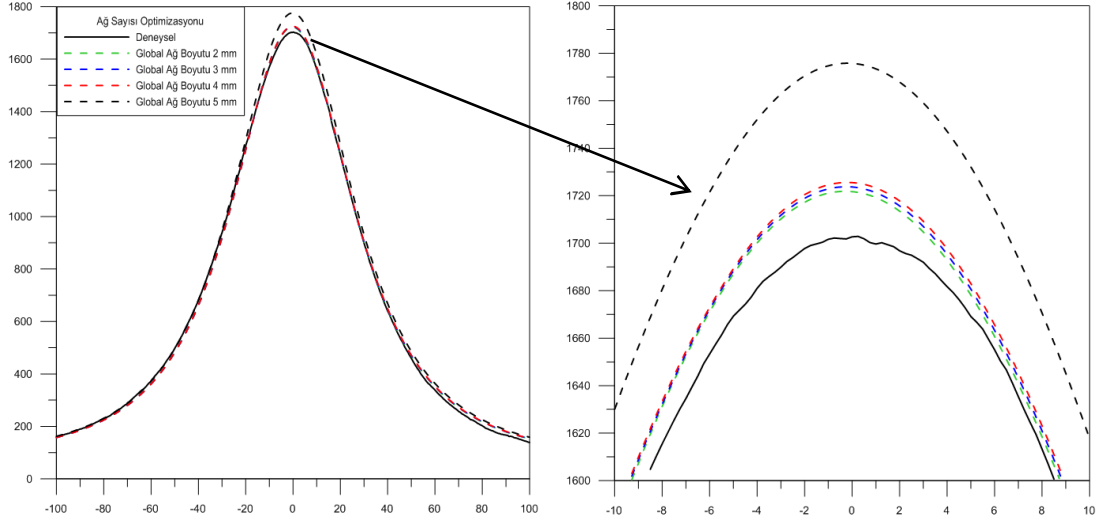
Bu 9 bölge için sıcaklık ve basınç değerleri girilmesi gerekmektedir. Şekil 5.15.'de sınır koşulları yazılımın ara yüz ekranında görülmektedir. Emme ve egzoz manifoldu sıcaklık, piston yüzey sıcaklığı, yanma odası üst çatı kısmı sıcaklığı, silindir gömlek sıcaklığı olmak üzere 7 farklı sıcaklık değeri ile emme ve egzoz hattındaki basınç değerleri de girilmektedir. Emme ve egzoz manifoldu basınç ve sıcaklık değerleri

deneysel verilerden alınmıştır. Piston yüzeyi, silindir gömleği ve yanma odası çatı kısmı sıcaklığı ise yanma gerçekleştirilmediği için ölçülen yağ sıcaklığı değerine göre ortalaması tespit edilmiş ve 328 K olarak yazılıma girilmiştir.

#### 5.4. Ağ Yapısı Optimizasyonu

Ağ yapısı optimizasyonu genel olarak analiz çalışmalarında çok önemli bir yere sahiptir. Çözümün düşük sayıda ağ yapısı ile yapılması durumunda analiz sonuçlarının doğrudan etkilendiği bilinmekte ve ağ yapısının çok fazla olması da analiz süresini arttırmakta ve ciddi bilgisayar kapasitesi (RAM) gerektirdiği için optimum ağ sayısının analiz öncesi her geometri için belirlenmesi gerekmektedir. Dinamik ağ yapısı ve adaptif ağ yapısı yenileme yöntemi nedeniyle anlık olarak ağ sayısı değişmektedir. Fakat yine de global ağ boyutu belirlemesi yapılmaktadır. Global ağ boyutu ise bütün ağ alanında oluşturulacak ağların boyutunun maksimum üst sınırı olarak belirlenmekte ve ağ boyutunun bu boyuttan büyük olmaması durumuna göre anlık olarak ağ yapısını oluşturmaktadır. Adaptif ağ yapısı ile anlık olarak ağ sayısının değişmesi yöntemi ile de silindir içi akışın olmadığı durumlarda ağ sayısını azaltarak çözümü hızlandırmaktadır. Akışın olduğu durumlarda ise akışın yoğun olduğu bölgede çok yoğun, geri kalan kısımda ise belirlenen global ağ boyutuna göre ağ sayısını belirlemektedir. Bu sayede haftalar sürebilecek çözüm sürelerini saat mertebesine indirebilmektedir. Ağ yapısı oluşturulmadan önce yüzey ve hacim bölgelerine ayrılma işlemi yapılmaktadır. Hazırlanan bölgelere uygun ağ yapıları otomatik olarak bu yazılımda gerçekleşmektedir. Ağ yapısı oluşturulurken otomatik olarak bir ağ sayısı ve global ağ boyutu belirlenmektedir. Hazırlanan geometri için global ağ boyutu 4,16 mm olarak yazılım tarafından belirlenmiştir. Bunun doğruluğu için global ağ boyutunun 5, 4, 3, 2 mm olması durumlarında silindir içi basınç ve kütleli hava debisi değerleri karşılaştırılmıştır.

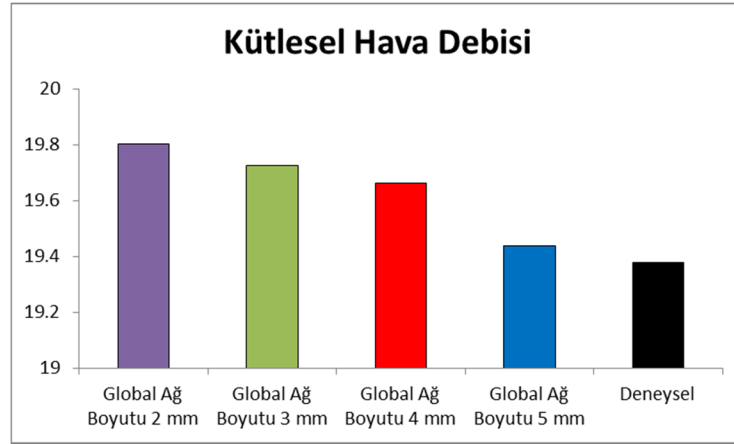




Şekil 5.16 Farklı global ağ boyutunun silindir içi basınca etkisi

Şekil 5.16.'da farklı global ağ boyutu için maksimum silindir içi basıncın nasıl etkilendiği görülmektedir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere 5 mm global ağ boyutu dışında diğer ağ boyutlarının birbirlerine yakın değerler verdiği anlaşılmaktadır.

Diğer bir önemli parametre olan kütleli hava debisi değerlerine global ağ boyutunun etkisi Şekil 5.17.'de görülmektedir.



Şekil 5.17 Farklı global ağ boyutunun kütleli hava debisine etkisi

Grafikte görüldüğü üzere sonuçların 4 mm global ağ boyutundan itibaren binde oranlarda etkisi olduğu görülmektedir. Her iki grafik değerlendirilirse, global ağ boyutunun 4 mm olarak seçilmesinin uygun olacağı anlaşılmaktadır. Bu netice ile tüm analizlerde global ağ boyutu 4 mm olarak seçilmiştir.

## BÖLÜM 6. DENEYSEL VE ANALİZ ÇALIŞMA SONUÇLARI

Bu bölümde; buji ateşlemeli motor için uygun olan ve buji yerine yerleştirilen basınç sensörü ile ölçülen silindir içi basınç, emme manifolduna bağlanan AVL Flowsonic cihazından alınan hava kütlesi debileri ve bu hava kütlesi debisine bağlı olarak hesaplanan volümetrik verim değerleri verilecek ve deneysel çalışma doğrultusunda yapılan analizlerin deney sonuçları ile doğrulanması gerçekleştirilmiştir.

### 6.1. Deneysel Ölçüm Sonuçları

Emme ve egzoz manifoldu sıcaklıklarının ölçülmesi için 0,1 derece hassasiyetli iki termokupl kullanılmıştır. Bu termokupllar emme ve egzoz manifoldu girişine yerleştirilerek havanın emme manifoldundan girişi ve egzoz manifoldundan çıkış sıcaklık değerleri ölçülmüştür.

Tablo 6.1. Deneysel çalışmadan elde edilen emme (giriş) ve egzoz (çıkış) hava sıcaklığı değerleri

Devir	Emme Sıcaklığı(K)	Egzoz Sıcaklığı (K)	EmSK Sıcaklık (K)
1600	293.4	307.7	293.4
1800	293.5	311.1	293.5
2000	293.5	314.1	293.5
2200	293.6	318.8	293.6
2400	293.6	322.7	293.6
2600	293.7	325.2	293.7
2800	294.0	329.9	294.0
3000	294.1	330.8	294.1

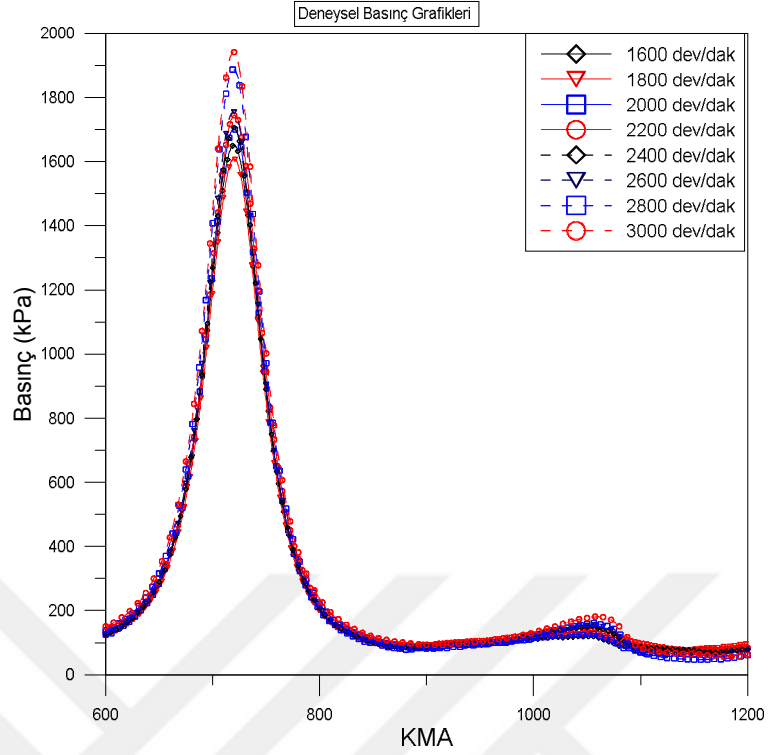
Tablo 6.1.'de bu sıcaklık değerleri görülmektedir. Emme supabının kapanması esnasında ki sıcaklık değeri analiz çalışması için gerekmekte ve yanmasız çalışma durumu için alındığı için havanın emme manifoldundaki sıcaklığı ile aynı değer alınmıştır.

Emme ve egzoz basınç değerleri için ayrı bir basınçölçer kullanılmamıştır. Silindir içi basınç ölçümleri tam bir çevrim için gerçekleştirilmiştir. Emme ve egzoz supabı açıkken, silindir içi basınç değerinin manifold basınç değerlerine yakın değer olması nedeniyle, emme ve egzoz prosesi oluşurken ki en düşük basınç değerleri alınmıştır. Tablo 6.2.'de basınç değerleri verilmiştir.

Tablo 6.2. Deneysel çalışmadan elde edilen emme (giriş) ve egzoz (çıkış) hava basıncı değerleri

Devir	Emme Basıncı (Pa)	Egzoz Basıncı (Pa)	EmSK Basıncı (Pa)
1600	75204	93510	102606
1800	94070	109835	102146
2000	79024	101283	104213
2200	79422	101601	105011
2400	97515	101480	103787
2600	98998	102227	107889
2800	99799	101717	118195
3000	98999	102513	118573

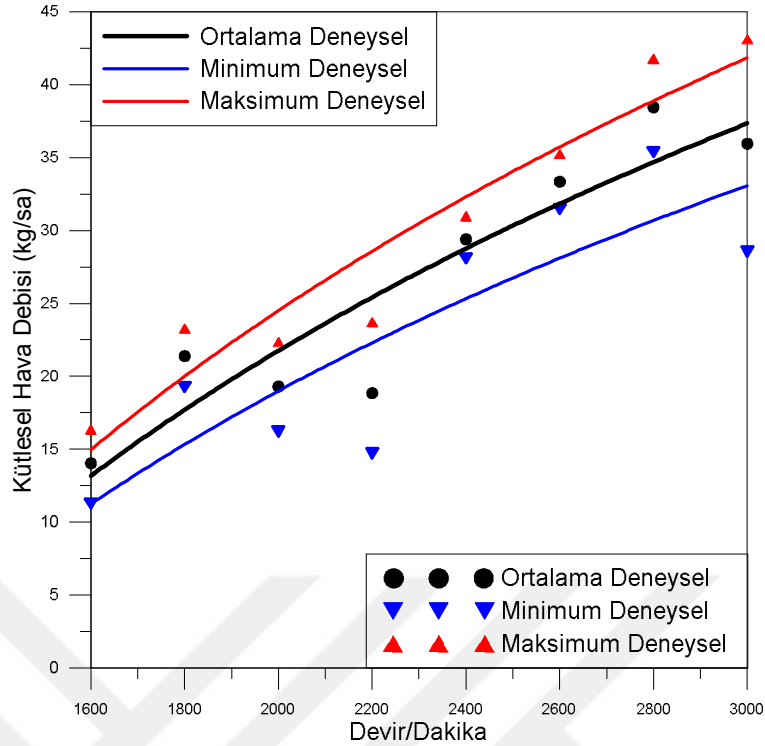
Analiz çalışmasında deneysel olarak ölçülen Tablo 6.1. ve 6.2.'deki değerler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve deneysel veri ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Tablodaki sıcaklık değerleri Kelvin, basınç değerleri ise Pascal birimindedir.



Şekil 6.1. Deneysel çalışmadan elde edilen silindir içi basınç grafikleri

Analiz çalışması için başlangıç zamanlaması emme supabı başlangıcı seçilmesi nedeniyle deneysel veri aralığı analizle aynı aralıkta alınmıştır. Bu nedenle Şekil 6.1.'deki silindir içi basınç grafiklerinin veri aralığının 600-1200 KMA arasında olduğu görülmektedir. 1600-3000 dev/dak. aralığında 200 dev/dak artımı ile silindir içi basınç ölçümleri alınmıştır.

Deneysel çalışma için daha önceki bölümlerde bahsedilen ve kütleli hava debisi için ultrasonik debimetre cihazı ile emme manifoldu girişindeki havanın kütleli debi ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler 180 saniye boyunca alınarak minimum, ortalama ve maksimum hava kütleli debileri Şekil 6.2.'deki gibi ortaya konmuştur.

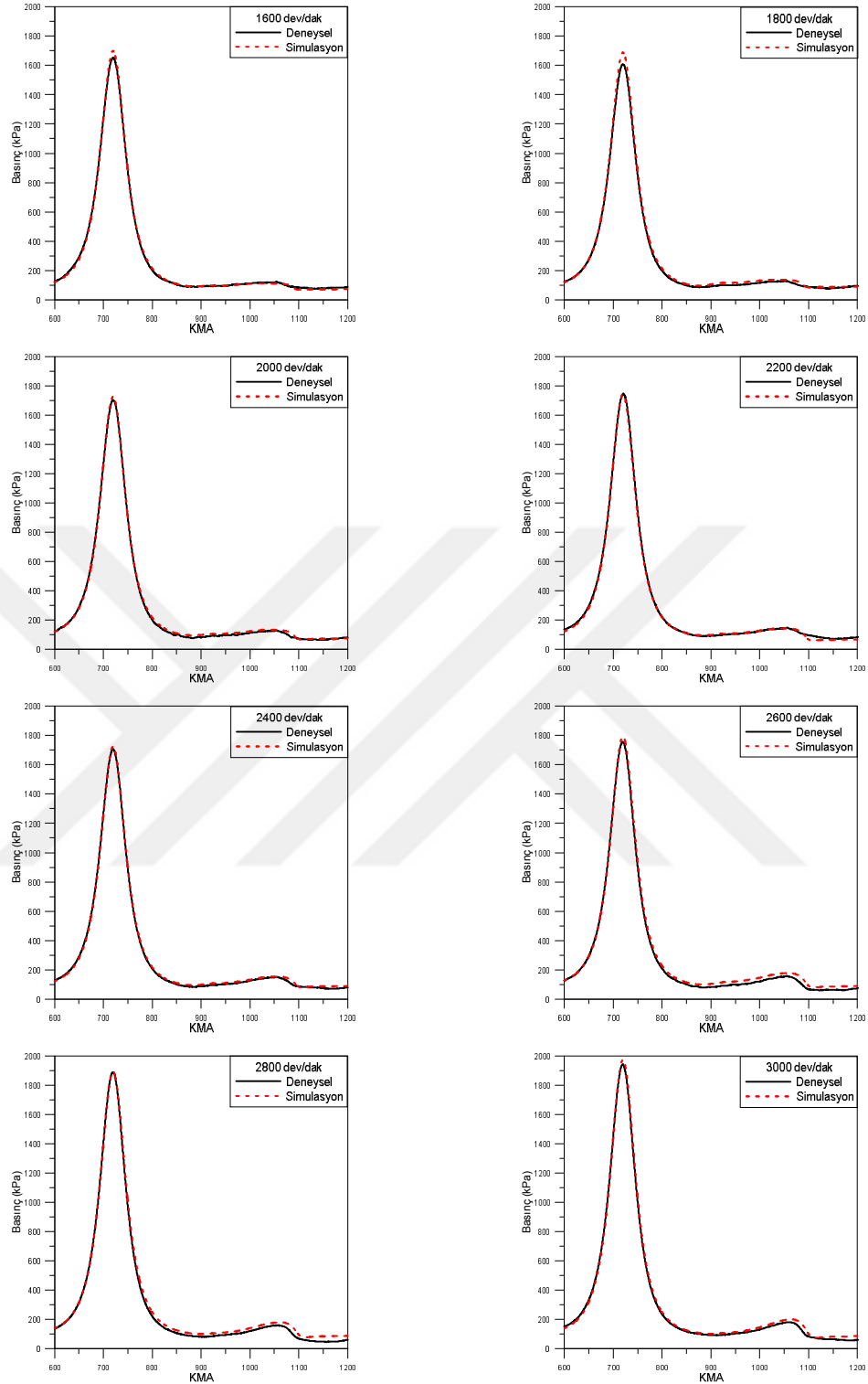


Şekil 6.2. Deneysel olarak ölçülen kütleli hava debisi

Test motorunun rölanti devri olan 1600 dev/dak itibari ile ölçümlere başlanmış ve kullanılan elektrik motorunun maksimum devri olan 3000 dev/dak aralığında ölçüm alınmıştır. Grafikte görüldüğü üzere 1800 dev/dak için hava kütleli debisinin arttığı ve sonra tekrar azalarak 2400 dev/dak itibari ile arttığı ve 2800 dev/dak'da maksimum değere ulaştığı anlaşılmaktadır. Devirin artması ile birlikte türbülansın da ciddi oranda artması nedeniyle 2800 dev/dak'dan sonra kütleli hava debisinin düşmeye başladığı görülmektedir.

## 6.2. Analiz Çalışmasının Doğrulaması

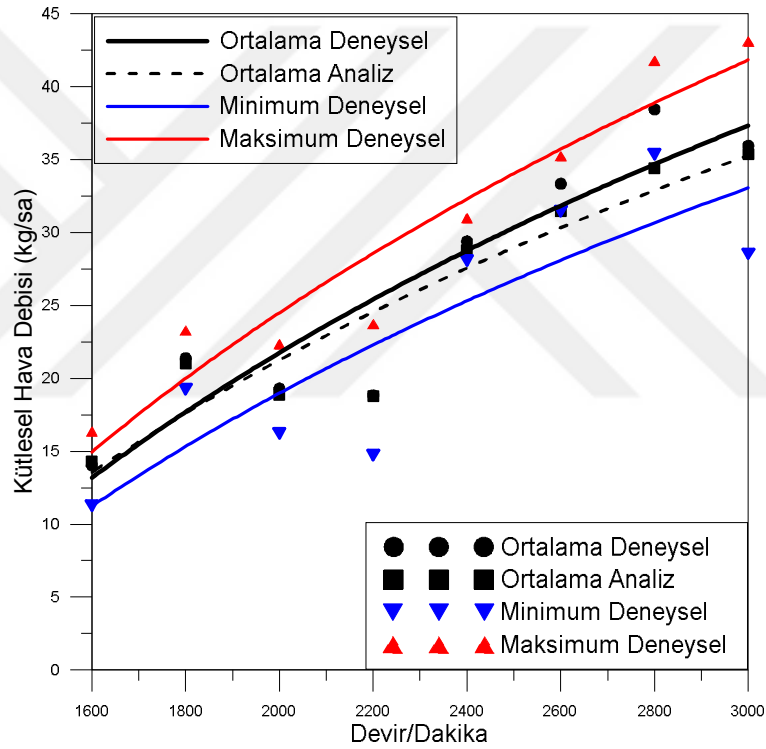
İçten yanmalı motor konusunda deneysel çalışmanın maliyetli ve zaman aldığı için analiz çalışmaları çok önemlidir. Analiz çalışmasının deneysel çalışma ile doğrulanması yapıldıktan sonra analiz çalışmasının gerçeğe çok yakın doğru sonuçlar vereceği kesindir. İçten yanmalı motorlarda bu doğrulama ise silindir içi basınç ile yapılmaktadır. Deneysel ve analiz için silindir içi basınç grafiklerinin uyumlu olması durumunda yanmasız durum için volümetrik verim, kütleli hava debisi gibi değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülebilir.



Şekil 6.3. Silindir İçi Basınç Grafikleri

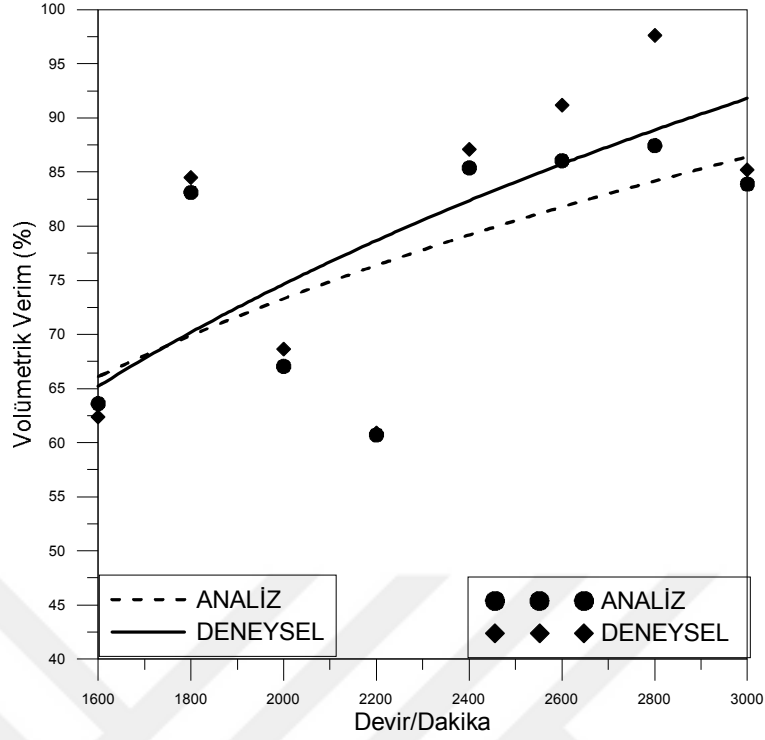
Bu nedenle deneysel çalışma yapılırken silindir içi basınç alınması deneysel olarak çalışılmayacak konularda analiz çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için önemlidir. Şekil 6.3.'de 1600-3000 dev/dak aralığında 8 farklı devir için krank açısına bağlı

silindir içi basınç grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde emme ve egzoz prosesleri yapılırken ki basınç grafikleri ve aynı zamanda sıkıştırma esnasında da basınç değerlerinin deneysel ve analiz sonuçlarının birbiri ile örtüştüğü görülmektedir. Bunun yanında deneysel ve analiz sonuçlarında supap bindirme sürecindeki basınç artışının etkisi görülmektedir. Bunun nedeni ise egzoz supabının kapanma sürecinin bittiği anlarda piston üst ölü noktaya yaklaşmakta ve akış alanı daraldığı için içerideki havanın dışarıya çıkamaması ve neticede devrin artması ile birlikte burada oluşan basıncın artmasına neden olmaktadır. Buda bize analiz çalışmasının önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.4. Deneysel ve Analiz Kütleli Hava Debisinin devir ile değişimi

Motorun emme havası debisi ölçümleri Şekil 6.4.'de görülmektedir. Grafik incelendiğinde genel eğilim olarak devir ile artış meydana geldiği görülmektedir. Deneysel sonuçlar ve analiz sonuçlarında da görüldüğü üzere 1800 dev/dak'da kütleli hava debisinin yaklaşık 21 kg/sa civarına yükseldiği ve sonrasında düşerek 2200 dev/dak kütleli hava debisinin yaklaşık 18 kg/sa olduğu ardından yükselerek sürekli bir artış gösterdiği ve maksimum debinin 2800 dev/dak'da yaklaşık olarak 38 kg/sa olduğu ve 3000 dev/dak'da tekrar düşmeye başladığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.5. Volümetrik verimin devir ile değişim grafiği

Motor için en önemli göstergelerden biri olan volümetrik verim Şekil 6.5.'de görülmektedir. Deneysel ve analiz sonuçlarının genel olarak birbirine yakın olduğu grafikten görülmektedir. Kütleli hava debisinde grafiğe benzer bir durum bu grafikte de görülmektedir 2600 ve 2800 dev/dak volümetrik verim değerlerinin deneysel ve analiz farkının açıldığı anlaşılmaktadır. Motorun rölanti devri olan 1600 dev/dak civarında volümetrik verimin % 62 civarında olduğu ve 1800 dev/dak'da %85 civarına yükselerek ardından düştüğü ve 2200 dev/dak'da 1600 dev/dak'dan daha düşük olduğu ardından 2400 dev/dak itibari ile yükselerek ortalama %90 civarında devam ettiği bu devirler arasında en iy volümetrik verimin 2800 dev/dak'da gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



## BÖLÜM 7. PARAMETRİK ÇALIŞMA VE SONUÇLARI

Bu bölümde, önerilen EMS mekanizması uygulamasının etkinliğini daha belirgin olarak belirleyebilmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ile parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmada, EMS olması durumunda motorun standart supap zamanlaması (EMS STD), emme supabının açılmasının 5 ve 10 derece erkene alınması (EmSA -10 ve EmSA -5) ve egzoz supabının kapanmasının 5 derece erken ve 5 derece geç olması (EgSK -5 ve EgSK +5) durumları incelenmiştir. Deneysel olarak standart kam profili ile yapılan testler ile doğrulama yapıldıktan sonra bu parametrik çalışmanın ön girdileri olarak alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir.

Analizlerin zamana bağlı olması ve dinamik ağ yapısı nedeniyle çok fazla CPU zamanı gerektiren bir çalışma olmaktadır. Dinamik ağ nedeniyle bilgisayar kapasitelerine göre farklılık göstermekle birlikte yaklaşık bir analiz ortalama 15 günlük CPU zamanı gerektirmektedir.

HAD yazılımında ön parametreler girilerek ardından supap profili okutulmaktadır. Emme supabı üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) açılma avansı bulunmamakta yani piston tam üst noktada iken açılmaya başlamakta ve alt ölü noktadan sonra (AÖNS) 40 KMA kapanmaktadır. Egzoz supabı ise alt ölü noktadan önce (AÖNÖ) 45 KMA açılmakta ve ÜÖNS'den 5 KMA kapanmaktadır. Bu zamanlamaya göre EMS hareket profili Matlab yazılımı yardımı ile oluşturulmuştur.

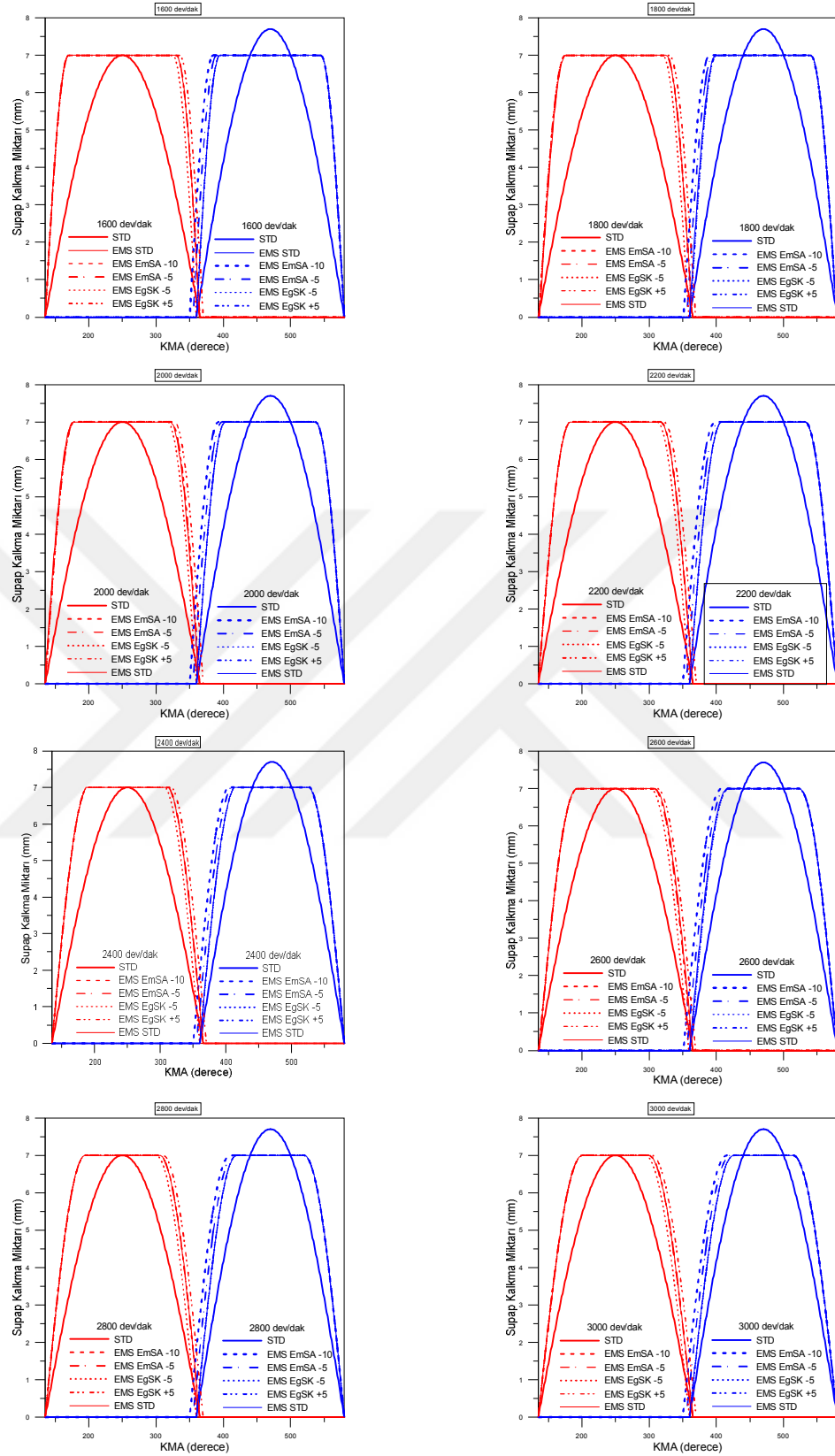
Bu adımdan sonra gerekli yüzey isimlendirmeleri ve yüzey tanımlamaları yapıldıktan sonra ağ yapısına geçilmektedir. Ağ yapısı için iki referans boyut girilmekte bu referans boyutlardan ilki 0.843 mm olarak girilmiştir. Diğer referans boyutu olarak global ağ ise 4 mm girilmiş ve ardından ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu yazılımda

gerekli sıcaklık ve basınç parametreleri girildikten sonra 1600-3000 dev/dak aralığında 200 dev/dak aralıklar ile EMS mekanizması için analizler gerçekleştirilmiştir.

### 7.1. Elektromekanik Supap Kalkma Profilleri

EMS mekanizması kısmındaki çalışma ise deneysel olarak çalışma zorluğundan dolayı literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda EMS mekanizmasında supabın sinyal verildikten sonra ne kadar sürede açıldığının tespit edilmesi gerekmektedir. Daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde EMS mekanizmasına sinyal verildikten sonra supabın 3,6 ms içerisinde tamamıyla açıldığı görülmüştür [40]. Bu durum ele alınarak klasik supap zamanlamasına göre EMS kalkma profilleri oluşturulmuştur. Supap profilleri incelendiği zaman standart 3,6 ms açılma süresinin 1600 dev/dak için 35 KMA'ya, 2000 dev/dak için 43 KMA'ya, 2400 dev/dak için 52 KMA'ya, 2800 dev/dak için 61 KMA'ya denk geldiği hesaplanmış ve bu duruma göre matlab yazılımı yardımıyla profiller oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere dev/dak artması ile EMS mekanizmasının sabit açılma tepkisine göre supap kalkma profilinin daraldığı Şekil 7.1.'de görülmektedir. Bunun anlamı yaklaşık 8000 dev/dak'dan sonra motora faydalı iş sağlayamayacağı klasik kam mekanizması gibi çalışacağı ya da supapların açılma ve kapanmada maksimum yüksekliğe ulaşamayacağı grafikten anlaşılmaktadır.

Supap profillerinin oluşturulması ve gerekli sınır şartları HAD yazılımına girildikten sonra analiz çalışmalarına devam edilmiştir.



Şekil 7.1. Değişken Supap Zamanlaması ile Elektromekanik Supap Profilleri

## 7.2. Ağ yapısı Görüntüleri

Şekil 7.2.'de emme supaplarının 1120 KMA anındaki ağ yapıları görülmektedir. Emme supabının 1080 KMA'da açılmaya başladığı ve bu anda tamamen kapalı olduğu, 1190 KMA'da ise standart supap profiline göre tamamıyla açıldığı supap profillerinde ortaya konmuştur.

Yani 1120 KMA esnasında standart supap profiline göre tam olarak açılmadığı fakat EMS profillerinde ise 2800 dev/dak ve 3000 dev/dak dışında diğer devirlerde tamamıyla açıldığı görülmektedir. Bunun sebebi ise EMS kullanıldığı durumlarda tepki süresinin sabit olması ve devir arttıkça motor hızının artmasına bağlı olarak supap açılma miktarı azalmaktadır. EmSA -5 ve EmSA -10 supapların daha erken açıldığı ve supap kalkma miktarının daha yüksek seviyede olduğu anlaşılmaktadır. EgSK -5 ve EgSK +5 durumlarında ise emme supabının açılma zamanının değişmediği ve EMS STD ile aynı seviyede açıldığı görülmektedir.

Supap hareketinin dinamik modelinin düzgün çalışabilmesi için dörtgenel ve düzenli ağ yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Yazılımın adaptif ağ yapısı yenileme tekniği sayesinde, ağ sayısı anlık olarak değiştirilerek analiz gerçekleştirilmektedir. Yazılım akışın hızlandığı bölgelerde ağ sayısını arttırarak çözüm hatalarını azaltmaktadır.

Ayrıca akışın düşük hızlarda olduğu bölgelerde ağ sayısını azaltarak daha hızlı çözüm yapabilme özelliğine sahiptir. Ağ yapısı görüntülerinden de anlaşılacağı üzere akış supabın etrafında arttığı için o bölgede ağ boyutlarının daha küçük olduğu ve manifoldlara doğru ağ boyutlarının büyüdüğü görülmektedir.

Ağ yapısını gösteren şekillerde de görüldüğü üzere supabın etrafında daha yoğun bir ağ yapısı oluştuğu, diğer bir ifadeyle akışın yoğunlaştığı bölgelerde daha küçük ve yoğun ağlar oluşturularak iyi bir çözüm sağlamaktadır. Kalan kısımlarda daha az ağ kullanarak toplam çözüm süresini kısaltmaktadır.



Şekil 7.2. 1120 KMA Emme Supapı Dinamik Ağ Yapısı Görüntüleri

Tablo 7.1. 1120 KMA Emme Supabı kalkma miktarı

	STD	EMS STD	EMS EmSA -5	EMS EmSA -10	EMS EgSK -5	EMS EgSK +5
1600 dev/dak	4,16 mm	7,00 mm	7,00 mm	7,00 mm	7,00 mm	7,00 mm
1800 dev/dak	4,16 mm	7,00 mm	7,00 mm	7,00 mm	7,00 mm	7,00 mm
2000 dev/dak	4,16 mm	6,95 mm	7,00 mm	7,00 mm	6,95 mm	6,95 mm
2200 dev/dak	4,16 mm	6,75 mm	6,96 mm	7,00 mm	6,75 mm	6,75 mm
2400 dev/dak	4,16 mm	6,30 mm	6,68 mm	6,93 mm	6,30 mm	6,30 mm
2600 dev/dak	4,16 mm	6,24 mm	6,62 mm	6,87 mm	6,24 mm	6,24 mm
2800 dev/dak	4,16 mm	6,06 mm	6,46 mm	6,76 mm	6,06 mm	6,06 mm
3000 dev/dak	4,16 mm	5,70 mm	6,14 mm	6,49 mm	5,70 mm	5,70 mm

Şekil 7.2. ve 7.3.'deki şekillerin daha iyi anlaşılabilmesi açısından, Tablo 7.1.'de emme supabının 1120 KMA esnasındaki supapların sayısal değer olarak hangi konumda olduğu verilmiştir.

Bu tablo incelenirse eğer yapılan çalışmada emme supabının klasik kam mekanizması ile açılması durumunda 1120 KMA'da her devirde sabit 4,16 mm açık olduğu görülmektedir.

EMS kullanılması durumunda, EMS sisteminin tepki süresinin sabit olmasının etkisiyle devir arttıkça tepki süresinin gecikmesi nedeniyle açılma mesafeleri değişmektedir. EMS STD durumunda 1600 ve 1800 dev/dak'ya kadar sistemin tepkisine göre supabın tamamıyla açıldığı görülmektedir. Devirin artması ile de tepki süresinin aynı kalmasından dolayı tamamıyla açılmasına yetişmemektedir.

EMS EmSA -5 bakıldığında ise neredeyse 2000 dev/dak'ya kadar tamamıyla açıldığı görülmektedir. EMS EmSA -10 durumuna bakıldığında ise neredeyse 2400 dev/dak'ya kadar supabın tamamıyla açıldığı anlaşılmaktadır. EMS EgSK durumlarına bakıldığında ise emme supabı zamanı değiştirildiği için EMS STD ile aynı tepkileri verdiği görülmektedir.



Şekil 7.3. 1060 KMA Egzoz Supapı Dinamik Ağ Yapısı Görüntüleri



Şekil 7.3.'de egzoz supapların 1060 KMA anındaki ağ yapıları görülmektedir. Egzoz supabının 855 KMA'da açılmaya başladığı ve bu anda tamamen kapalı olduğu, 970 KMA'da ise standart supap profiline göre tamamıyla açıldığı supap profillerinde ortaya konmuştur. Burada egzoz supabının kapanma zamanı değiştirildiği için egzoz supabı 1085 KMA'da tamamen kapalı konuma gelmesi düşünüldüğü zaman 1060 KMA esnasında standart supap profiline göre tam olarak kapanmadığı fakat EMS profillerinde ise 1600 dev/dak ve 1800 dev/dak dışına diğer devirlerde tam açık konumda olduğu yani kapanmaya başlamadığı görülmektedir. EgSK -5 ve EgSK +5 durumlarında egzoz supabının 5 derece erken ve geç kapanması farkı anlaşılmaktadır. Diğer durumlardan EmSA -5 ve EmSA -10 durumlarında ise egzoz supapların açılıp kapanma zamanı değişmediği ve EMS STD ile aynı seviyede kapandığı görülmektedir.

### 7.3. Hız Dağılımı Sonuçları

Emme prosesi esnasındaki hız vektörlerinin yanma verimine etkisi olduğu için emme prosesi yapılırken ki krank mili açıları hava akış hız görselleri için seçilmiştir. Emme supabının açılma zamanı 1080 KMA'dır. Bu zamanlamaya göre farklı KMA'daki hava partiküllerinin hareketleri ve hızları görsel olarak görülmektedir.

Şekil 7.4.'de 1160 KMA anındaki hava akış hız dağılımları görülmektedir. Emme supabının 1080 KMA'da açılmaya başladığı ve bu anda tamamen kapalı olduğu, 1190 KMA'da ise standart supap profiline göre tamamıyla açıldığı göz önünde bulundurularak. 1160 KMA esnasında ki hava akış hız dağılımlarının manifold ve silindir içini de kapsayacak şekilde alınan kesit görüntüsü ile şekilde verilmiştir.

Şekilde hava hızının bölgesel olarak dağılımını anlamak adına renk skalası ile verilmiştir. Bu renk skalası tüm durumlar için 0-100 m/s aralığında alınarak görseller eş olacak şekilde düzenlenmiştir.



Şekil 7.4.'deki görseller incelendiğinde pistonun neredeyse tam ortada olduğu 1160 KMA esnasında egzoz supabının kapalı olması nedeniyle egzoz manifoldu kısmında hava hareketlerinin olmadığı görülmektedir.

Şekilden de anlaşılacağı üzere motor devrinin artması ile genel hava hareketlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. EMS durumlarının neredeyse tamamında supap açılma hızının yüksek olmasından kaynaklı olarak akış kesiti çok hızlı genişlemiş ve bu nedenle akış hızları genel olarak standart kam profiline göre 1160 KMA'da daha da düştüğü gözlemlenmiştir.

Genel olarak incelendiğinde ise düşük devirlerde supap kesitinden geçen havanın akış hızının 50-60 m/s değerlerinde olduğu motor devrinin artması ile birlikte 100 m/s değerlerine çıktığı görülmektedir.

Silindir içi hava hızları incelendiğinde düşük devirlerde hız değerleri 10-20 m/s aralığında iken devir yükseldikçe bu aralığın 20-40 aralığına kadar yükseldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 7.4. 1160 KMA Silindir içi ve Manifold hız dağılımı

Şekil 7.5.'de 1200 KMA anındaki hava akış hız dağılımları görülmektedir. Genel olarak renk skalasına bakılacak olursa, pistonun AÖN'ya çok yaklaştığı 1200 KMA

esnasında egzoz supabının kapalı olması nedeniyle egzoz manifoldu kısmında hava hareketlerinin olmadığı görülmektedir.

Şekilden de anlaşılacağı üzere motor devrinin artması ile genel hava hareketlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Pistonun tam olarak AÖN'ye ulaşmadığı göz önünde bulundurulursa vakumun artması ve silindir içi basıncın çok düşmesinden dolayı EMS durumlarının neredeyse tamamında akış hızları genel olarak standart kam profiline göre 1200 KMA'da yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Genel olarak incelendiğinde ise düşük devirlerde supap kesitinden geçen havanın akış hızının 30-50 m/s değerlerinde olduğu motor devrinin artması ile birlikte 100 m/s değerlerine çıktığı görülmektedir.

Silindir içi hava hızlarına bakıldığında ise düşük devirlerde 0-20 m/s aralığında iken devir yükseldikçe bu aralığın 20-40 aralığına kadar yükseldiği şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 7.5. 1200 KMA Silindir içi ve Manifold hız dağılımı

Şekil 7.6.'da hava akış hız dağılımının 1260 KMA anındaki görselleri görülmektedir. Supapların kapanmaya başladığı ve 1300 KMA'da tamamıyla kapanacağından dolayı hacim azalmaya başlamakta ve silindir içi hava miktarının ve basıncın artması ile birlikte silindir içi hava hareketleri azalmaktadır.

EMS durumlarının hepsindeki supaplar STD durumuna göre daha fazla açık konumdadır. Bu nedenle bir bakıma artık sıkıştırma durumuna geçtiği ve içerideki hava hızı dağılımları düştüğü görülmektedir. 1260 KMA'da daha da düştüğü gözlemlenmiştir.

Genel olarak incelendiğinde ise düşük devirlerde supap kesitinden geçen havanın akış hızının 0-10 m/s değerlerinde olduğu motor devrinin artması ile birlikte 30 m/s değerlerine çıktığı görülmektedir.

Silindir içi hava hızlarına bakıldığında ise düşük devirlerde 0-10 m/s aralığında iken devir yükseldikçe bu aralığın 10-20 aralığına kadar yükseldiği şekilden anlaşılmaktadır.



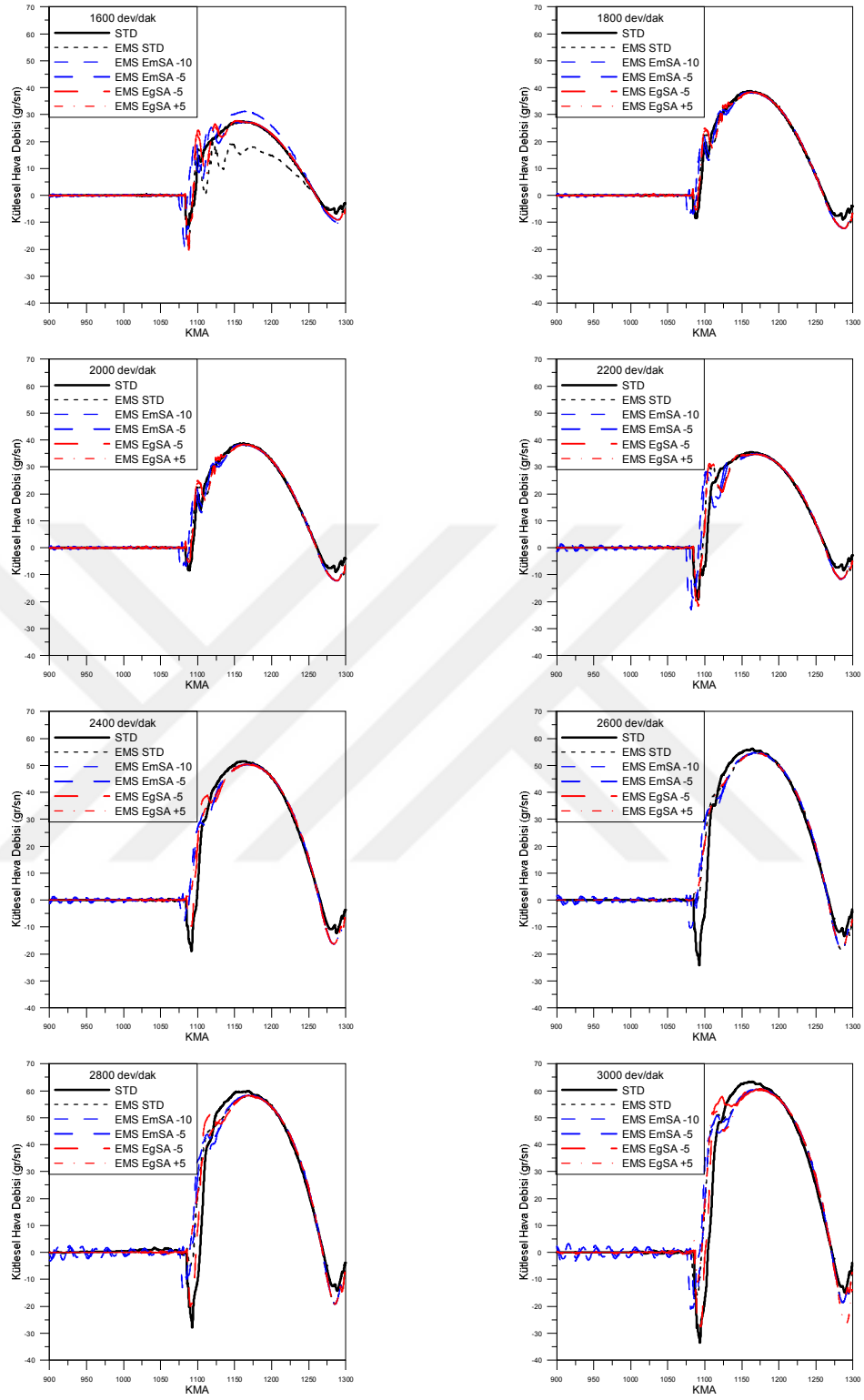
Şekil 7.6. 1260 KMA Silindir içi ve Manifold hız dağılımı

#### 7.4. Kütlesel Hava Debisi Sonuçları

Şekil 7.7.'de ise analiz verilerinden elde edilen emme manifoldu kesitinden içeri giren hava kütle debisi değişimi görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere başta silindir içinde hiç hava hareketi olmadığı için sıfır değerindedir. Bu grafikten görülen değer KMA açısına bağlı hava kütleli debi değişimidir.

Grafikler incelendiğinde standart supap profili için emme supaplarının ilk açıldığı anda devir arttıkça silindir içi basıncın artması neticesinde içeri hava girmesinden ziyade havanın ters akışa döndüğü anlaşılmaktadır. Bu ters akış etkisi ile hava manifolddan dışarı yönlü hareket ettiği düşünülmektedir. Silindir içine doğru hava akışının artması ile birlikte kütleli hava debisinin pozitif artışa geçtiği ve tüm devirler için yaklaşık olarak 1150 KMA değerinde maksimum değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değer de emme supabının maksimum kalkma miktarına ulaştığı değere denk geldiği anlaşılmaktadır. Silindir içi basıncın vakum etkisinden dolayı düşmesi neticesinde emme manifoldundan geçen kütleli hava debisinin azalmaya başladığı ve supabın kapanmasına yakın silindir içi basıncın artması ve pistonun yukarı yönlü hareketinden kaynaklı olarak tekrar dışarı hava çıkışı olduğundan dolayı kütleli hava debisinin eksiye düştüğü grafikten anlaşılmaktadır.

EMS kullanılması durumlarında böyle bir durum oluşmamaktadır. Bunun nedeni ise egzoz supabı kapanıp emme supabı açılırken silindir içi basıncın artışı az olduğundan dolayı olduğu anlaşılmaktadır. Tüm durumlar için emme manifoldu kütleli hava debisinin maksimum 40-65 gr/sn aralığında olduğu genel olarak debinin artışının devire bağlı olduğu düşünülmektedir. 1260 KMA'dan sonra pistonun AÖN'yi geçtiği ve emme prosesinin hala devam ettiği görülmekte burada egzoz supabı açılmadığı içinde emme manifolduna ters akış olduğu görülmektedir. Yani emme supabının geç kapanması özellikle 3000 dev/dak'da ise ters hava akışının yaklaşık 20 gr/sn civarına kadar yükseldiği görülmektedir. Düşük devirlerde ise ters hava akışının maksimum 10 gr/sn olduğu görülmektedir.



Şekil 7.7. Emme manifoldu kütesel hava debisi



### 7.5. Silindir İçi Basınç Sonuçları

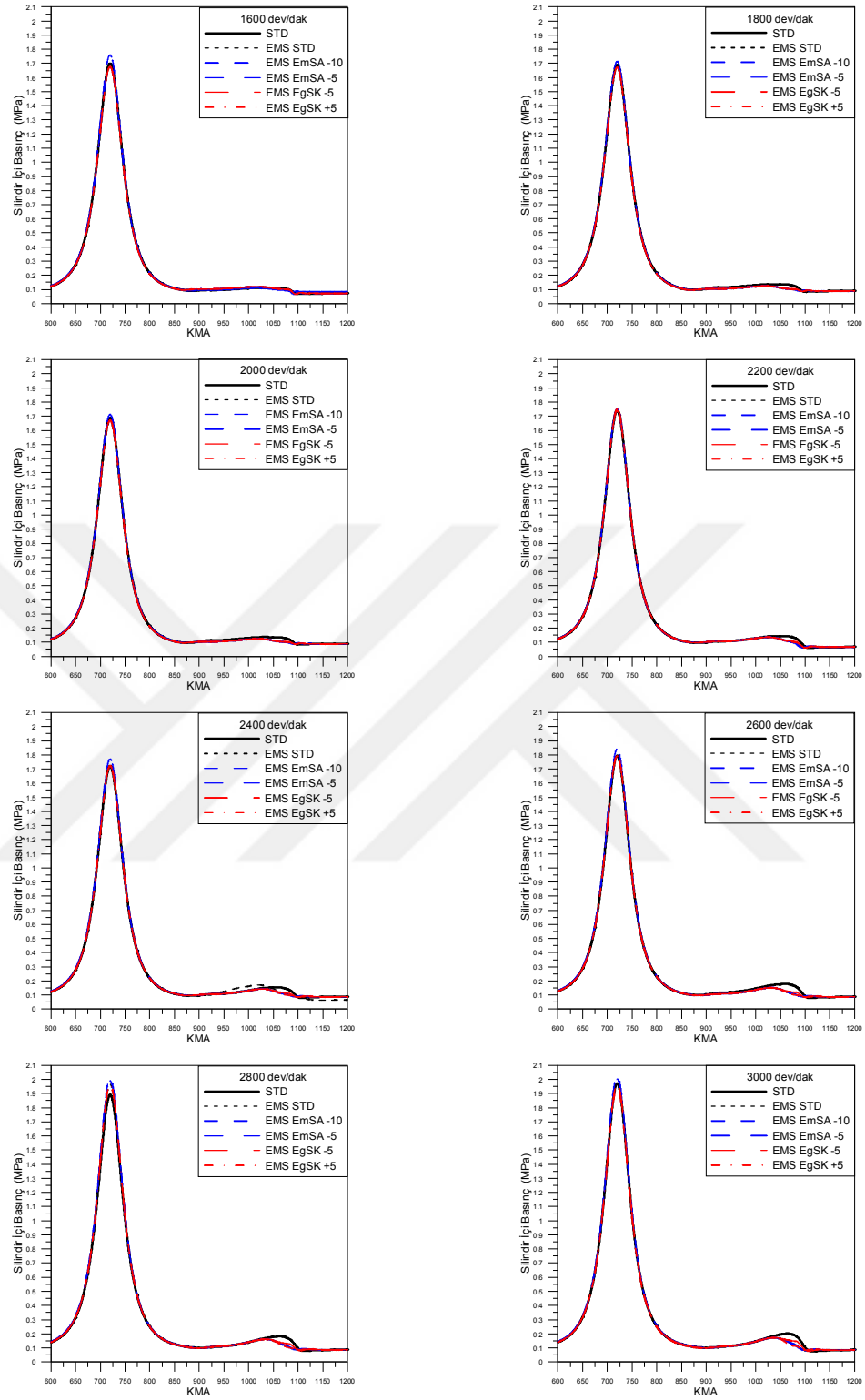
Şekil 7.8.'de analiz verilerinden elde edilen silindir içi basıncın KMA ile değişimi görülmektedir. Grafikler incelendiğinde maksimum basıncın 1,6 ile 2,1 MPa basınç aralığında olduğu görülmektedir.

Standart supap profili için silindir içi basıncın supap bindirme sürecinde artış gösterdiği deneysel çalışmada da analiz çalışmasında da görülmüştür. Bunun nedeni supabın yavaş yavaş kapanması ve bu kapanma sürecinde pistonun yukarı yönlü hareketi sonucu içerideki basıncın artmasından kaynaklanmaktadır.

EMS sisteminde supabın açılma ve kapanma hızının yüksek olmasından kaynaklı olarak supap bindirme sürecinde silindir içi basıncın dengelenmesi kısa bir süre içerisinde gerçekleşmektedir. Bundan dolayı da EMS kullanılan durumlarda basınç artışı meydana gelmemektedir.

Supap bindirmesinin kısa olması nedeniyle düşük devirlerde silindir içi basıncın dengelenmesi için yeterli zaman olduğu için daha az etki göstermektedir. Fakat devir arttıkça silindir içi basınç dengelenmesi için gereken zaman azalmakta ve silindir içi basınç artışı meydana gelmektedir.

Bütün durumlarda maksimum silindir içi basıncın standart kam profiline göre daha fazla gerçekleştiği görülmektedir. En çok artış ise 2800 dev/dak' da gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 7.8. Silindir İçi Basınç Grafiği

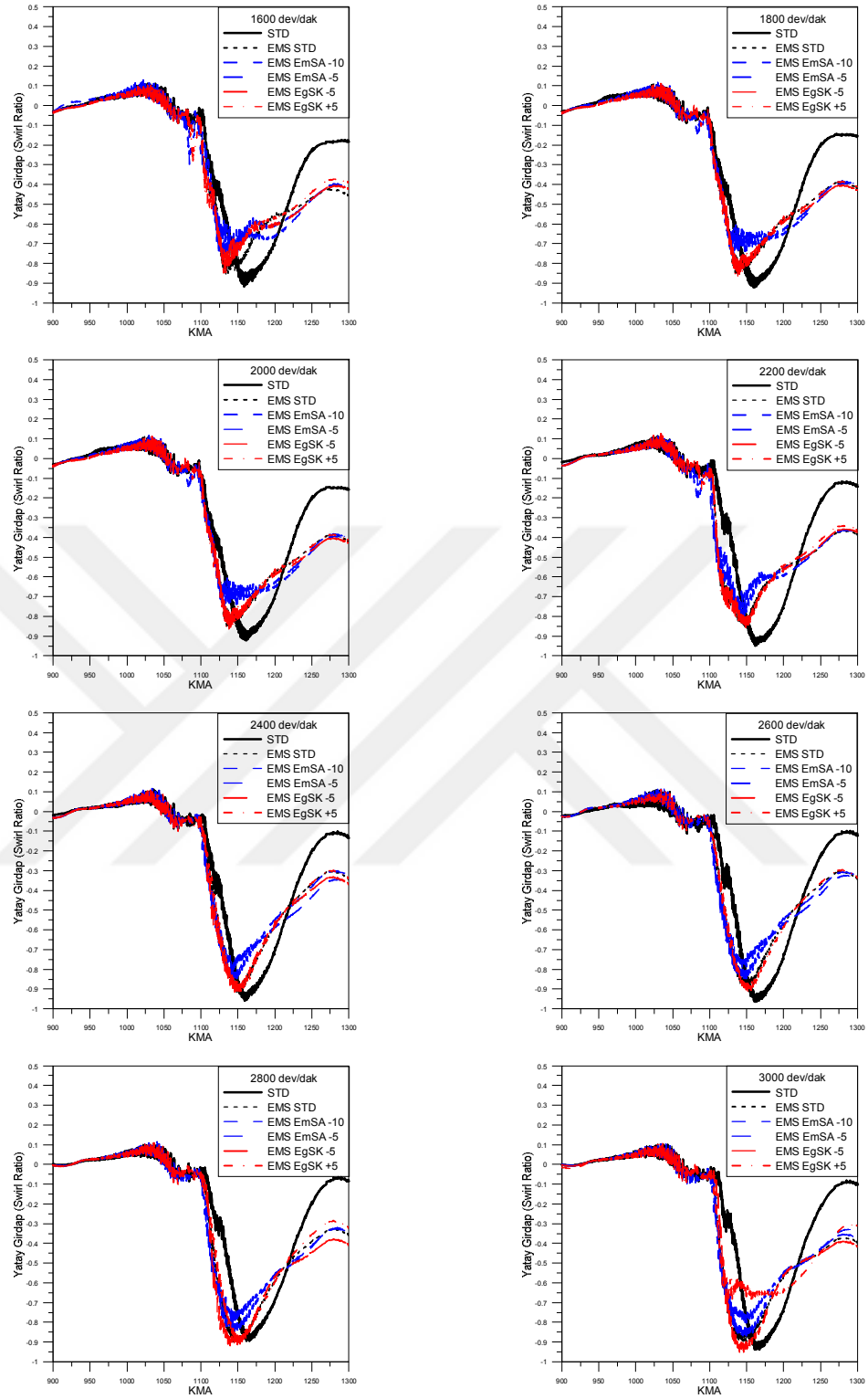
## 7.6. Yatay Girdap Sonuçları

Silindir içi karışım oluşumunun en önemli göstergelerinden biri de yatay girdap değeridir. Şekil 7.9.'da ise 6 farklı supap durumu ve 8 farklı devir için yatay girdap değerleri görülmektedir.

Analiz programında eksenlerin programın kendi altyapısında ki hesaplama yöntemine göre farklı tanımlanmasından kaynaklı olarak maksimum noktanın negatif değerde olduğu görülmektedir. Bunun tamamıyla farklı eksen tanımlamasından kaynaklı olduğu ve maksimum değer pozitif olarak düşünülürse eğer yatay girdap değerinin tüm devirlerde maksimum 0,9-1 aralığında olduğu görülmektedir.

Maksimum olduğu noktanın ise standart kam profiline göre 1150 KMA'da olduğu görülmüştür. EMS sistemlerinde ise EmSA durumları için erken açılma durumlarına göre yatay girdap değerinin çok fazla değişmediği fakat maksimum olduğu noktanın daha erken olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır.

Yatay girdabın maksimum değerine, supap mekanizmasının değişiminin çok fazla etkisi olmadığı ve genel olarak manifold geometrisinin maksimum değere etkisi olduğu bilinmektedir. Yatay girdabın maksimum olduğu nokta EMS sistemi ile DSZ uygulanarak istenen KMA değerinde olması sağlanabilir.



Şekil 7.9. Yatay Girdap (Swirl Ratio)

### 7.7. Dikey Girdap Sonuçları

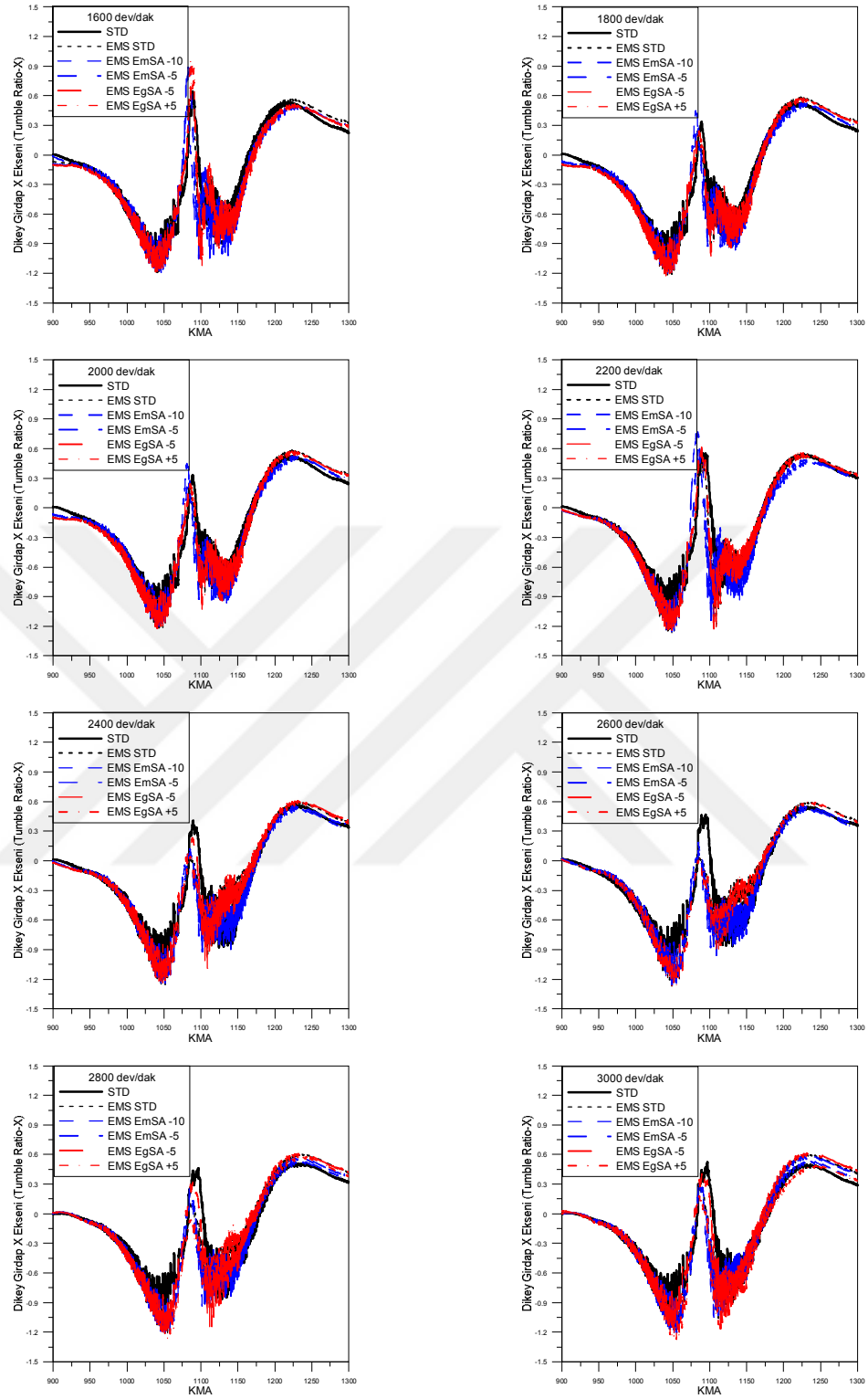
Silindir içi karışım oluşumunun en önemli göstergelerinden bir diğeri de dikey girdap (tumble x) oranıdır. Şekil 7.10.'da ise dikey girdap (tumble x) oranı değerleri görülmektedir.

Tumble x oranı grafikleri incelendiğinde egzoz prosesi süresince ters etki olarak sürekli düştüğü emme supabının açılması ile ani bir yükseliş sonrasında ise bir düşüş etkisi ile sonrasında tekrar artış trendi göstermektedir. Emme prosesi boyunca da tüm devirlerde maksimum 0,6 değerine ulaştığı görülmektedir.

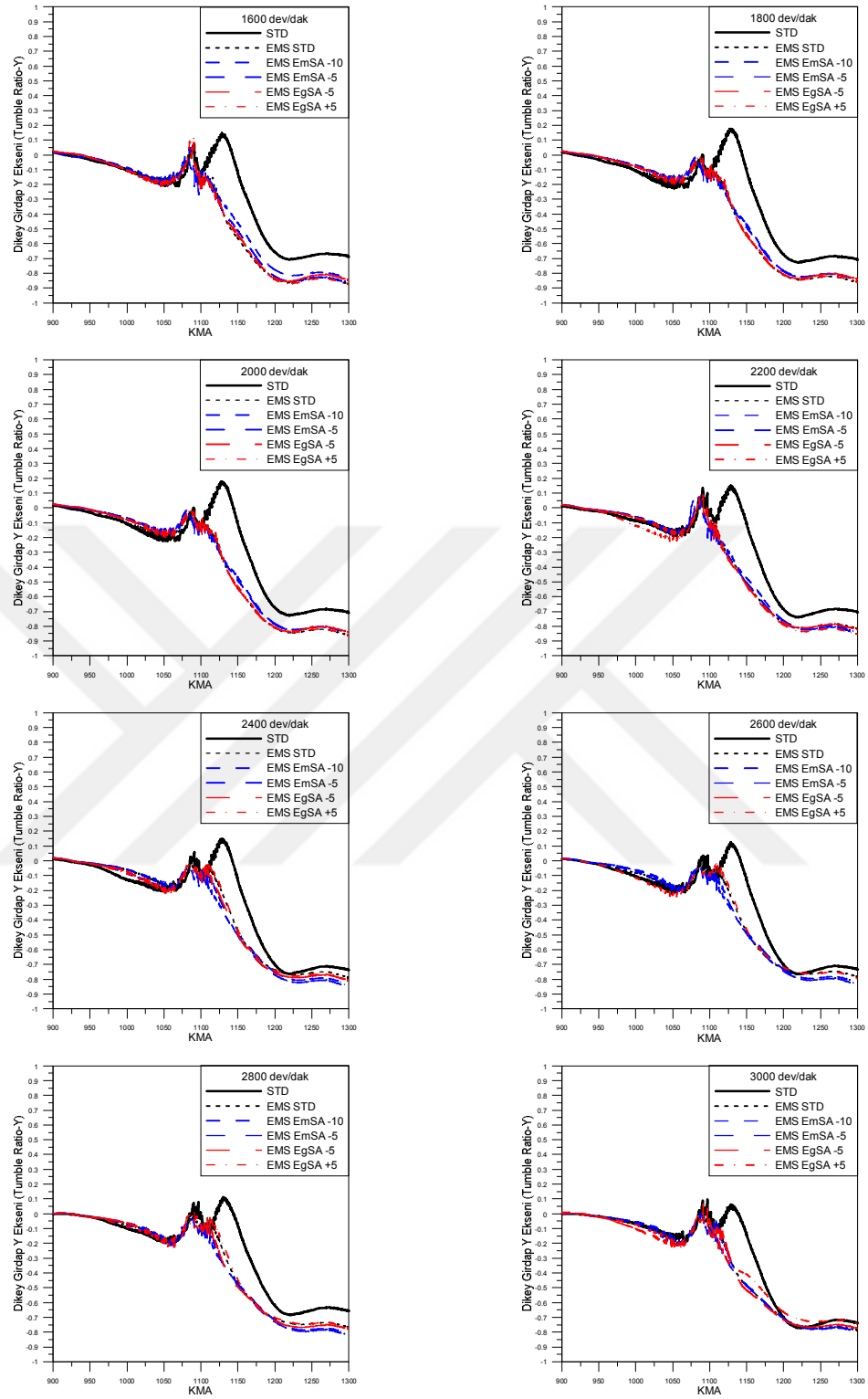
Emme supabının kapanmasına yakın yaklaşık 1220 KMA itibaren hafif bir iniş trendi izlediği grafiklerden görülmektedir. EMS sistemlerinde ise EmSK durumları için sadece supap bindirme sürecindeki meydana gelen ani bir artışın standart kam mekanizmasına göre daha düşük seviyelerde gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 7.11.'de ise dikey girdap (tumble y) oranı değerleri görülmektedir. Tumble y oranı grafikleri incelendiğinde, egzoz prosesi süresince ters etki olarak sürekli düştüğü emme supabının açılması ile ani bir yükseliş ve bir düşüş etkisi ile sonrasında tekrar artış, son olarak azalış trendi göstermektedir.

Emme prosesi boyunca da tüm devirlerde maksimum 0,6-0,8 aralığında seyrettiği görülmektedir. Standart kam profiline göre 1140 KMA civarında meydana gelen artış EMS mekanizmalı durumlarda görülmemektedir.



Şekil 7.10. Dikey Girdap (Tumble) X



Şekil 7.11. Dikey Girdap (Tumble) Y

### 7.8. Silindir İçinde Kalan Hava Kütlesi Sonuçları

Şekil 7.12.'de silindir hacmindeki hava kütlesinin krank açısına bağlı değişimi görölmektedir. Grafiklere bakıldığında düşük devirlerde egzoz supabının açılmasıyla bir miktar havanın geri tepme etkisi ile ilk başta içeri girdiği, ardından pistonun süpürme hareketinden dolayı tekrar azalmaya başladığı ve ÜÖN'ye kadar sürekli azaldığı bu esnada kapanması ve emme supabının açılması ile tekrar artmaya başladığı görölmektedir. Yüksek devirlerde iç basıncın fazla olması nedeniyle yeterli basınç kuvvetleri oluşamadığı için bu olay söz konusu olamamaktadır.

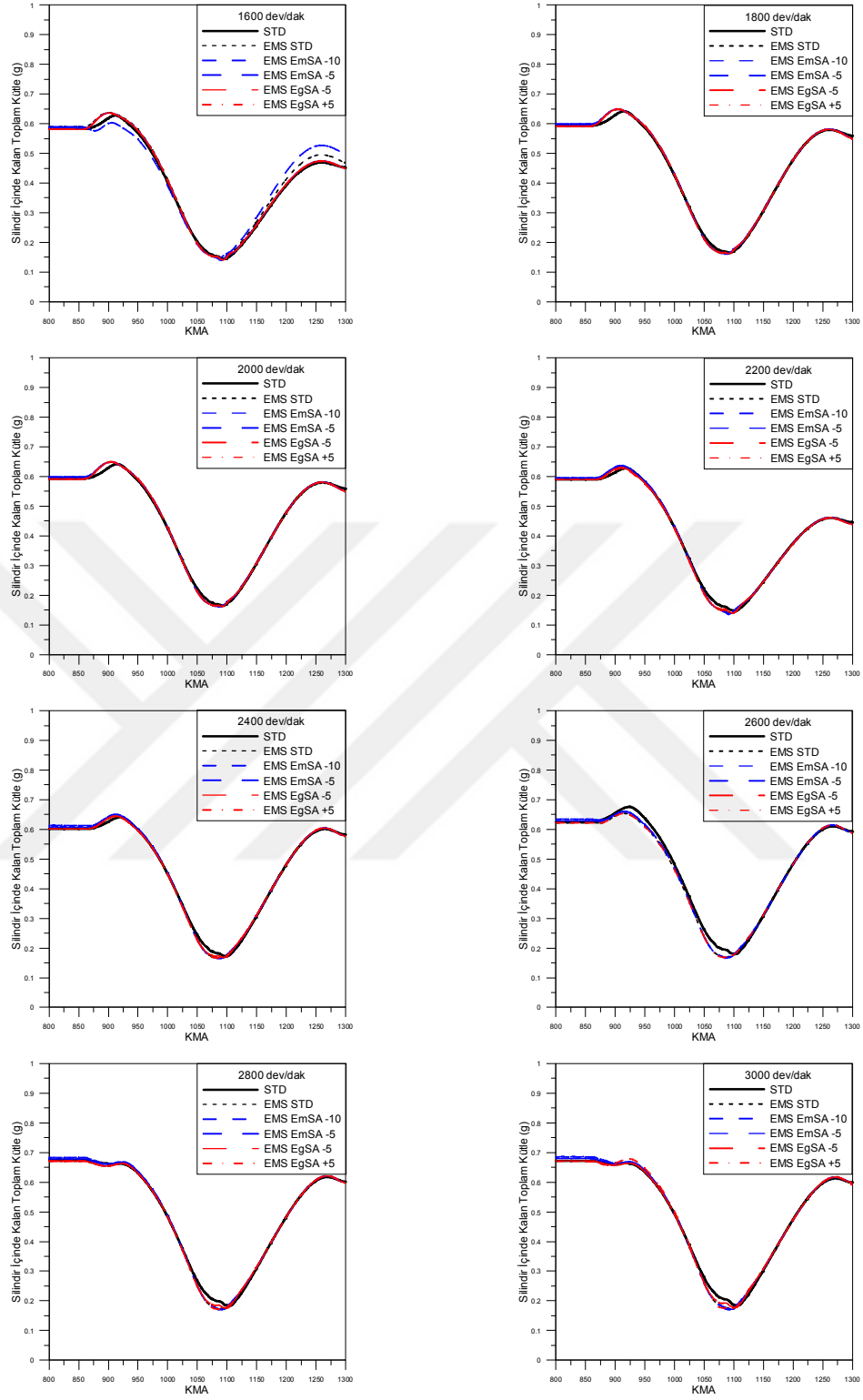
Emme supabının kapanma gecikmesi esnasında yani pistonun 1260 KMA'dan sonra silindir içindeki havanın azaldığı görölmektedir.

Bu motor için emme supabının kapanma gecikmesi 40 KMA olması yani pistonun AÖN'den sonra yukarı yönlü hareketinden kaynaklanan bir etkiden dolayı silindir içinde kalan hava kütlesi emme portuna doğru hareket etmektedir. Bu kapanma gecikmesinin etkisi, konvansiyonel kam mili ve EMS durumlarında da görölmektedir.

Bunun nedeni ise emme manifoldundaki akışta görüldüğü üzere ters hava akışlarının meydana geldiği, pistonun yukarı yönlü hareketi ile silindir içerisindeki havanın emme manifoldu basıncını yenerak ters akış oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

Bu motorun kapanma gecikmesinin ters akıştan dolayı, volümetrik verime olumsuz etkide bulunduğu anlaşılmaktadır.





Şekil 7.12. Silindir içinde kalan toplam kütle

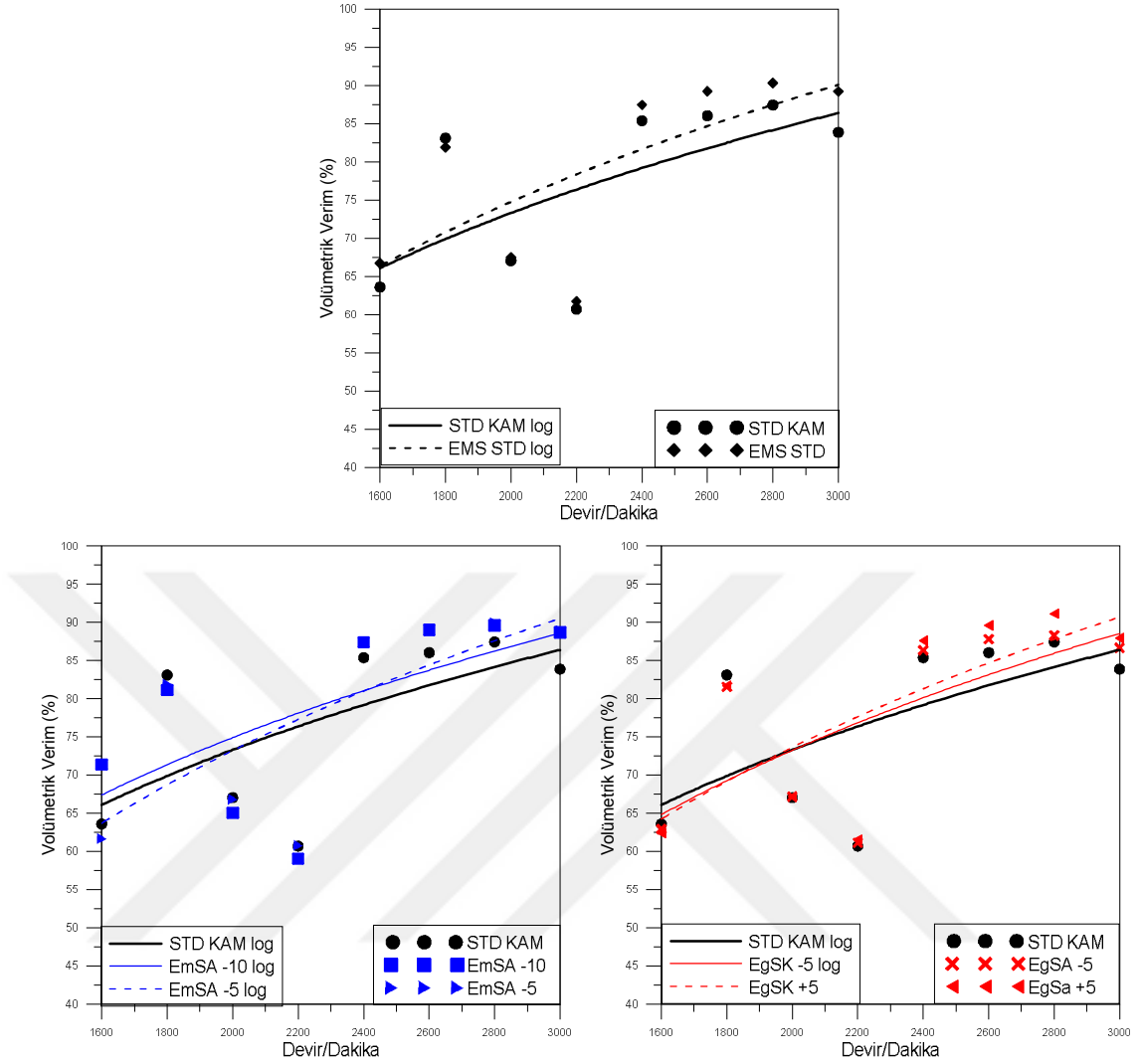
### 7.9. Volümetrik Verim Sonuçları

Şekil 7.13.'de volümetrik veriminin motor hızı ile değişimi görülmektedir. Deneysel ve analiz sonuçların genel olarak birbirine yakın olduğu grafikten görülmektedir. Kütleli hava debisinde grafiğe benzer bir durum bu grafikte de görülmektedir 2600 ve 2800 dev/dak volümetrik verim değerlerinin deneysel ve analiz farkının açıldığı anlaşılmaktadır.

Motorun rölanti devri olan 1600 dev/dak civarında volümetrik verimin % 62 civarında olduğu ve 1800 dev/dak'da %85 civarına yükselerek ardından düştüğü ve 2200 dev/dak'da 1600 dev/dak'dan daha düşük olduğu ardından 2400 dev/dak itibari ile yükselerek ortalama %90 civarında devam ettiği bu devirler arasında en iyi volümetrik verimin 2800 dev/dak'da gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

EMS kullanıldığı durumlar incelendiğinde standart supap zamanlaması durumlarının standart kam profili durumlarına göre hepsinde volümetrik verimin arttığı görülmüştür. Bu durumlar içerisinde en yüksek volümetrik verim artışının ise %6,3 ile 3000 dev/dak'da gerçekleştiği grafikte görülmektedir.

EmSK 10 derece erkene alındığı durum değerlendirilirse eğer 2000 dev/dak'ya kadar volümetrik verime olumsuz etkisi olduğu ve 2200 dev/dak itibari ile volümetrik verimde standart kam mekanizmasına göre iyileşme sağladığı grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 7.13. Volümetrik verimin motor hızına göre değişimi

EmSK 5 derece erkene alındığı durum değerlendirilirse eğer 1800 dev/dak'ya kadar volümetrik verime olumsuz etkisi olduğu ve 2000 dev/dak itibari ile volümetrik verimde standart kam mekanizmasına göre iyileşme sağladığı görülmektedir.

EgSK 5 derece erkene alındığı durum değerlendirilirse eğer 1800 dev/dak'ya kadar volümetrik verime olumsuz etkisi olduğu ve 2000 dev/dak itibari ile volümetrik verimde standart kam mekanizmasına göre iyileşme sağladığı anlaşılmaktadır.

EgSK 5 derece geç kapandığı durum değerlendirilirse eğer 1800 dev/dak'ya kadar volümetrik verime olumsuz etkisi olduğu ve 2000 dev/dak itibari ile volümetrik verimde standart kam mekanizmasına göre iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır.

Konvansiyonel kam mili kullanılması durumundaki emme havası basınç ve sıcaklık değerleri alınarak EMS durumlarının analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna rağmen genel eğilim olarak EMS sisteminin volümetrik verimi arttırdığı görülmüştür.

EMS sisteminin konvansiyonel kam profiline göre daha hızlı açılıp kapanmasının etkisi ile basınç dengelenmesi daha hızlı gerçekleşecektir. Aynı zamanda EMS sistemi pompalama kayıplarının minimize edeceğinden dolayı daha iyi bir volümetrik verim artışı sağlayacağı aşıkardır.

## **BÖLÜM 8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME**

Bu tez çalışmasında, tek silindirli buji ateşlemeli bir motor için EMS mekanizması uygulanması durumunda volümetrik verime etkisine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan birçok çalışmada bu sistemin faydalı olacağı konusundan bahsedilmiş ve EMS mekanizması denemeleri yapılmıştır. Fakat gerçek zamanlı motor test düzeneği üzerinde tam olarak çalıştırılmadığı görülmüştür. Buna yönelik olarak motorun klasik supap sistemi ile çalışması durumundaki hava debisi ölçümlerini hassas ölçüm yapan ultrasonik debimetre ile ölçülmüş deneysel veriler ve analiz çalışması ile doğrulanmıştır. EMS mekanizması uygulanması durumunda motorun volümetrik verimine nasıl bir etkide bulunacağı analiz olarak parametrik çalışılmıştır. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılan önemli özelliklerinden biri de analiz ile gerçek zamanlı olarak EMS ve DSZ uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilen bu çalışmada 8 farklı devir için hava akış debileri ve silindir içi basınç değerleri deneysel olarak ölçülmüş ve bu deneysel çalışma ile analiz çalışmasının doğrulaması yapılmıştır. EMS mekanizması uygulaması için 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılarak farklı devir ve farklı supap zamanlamalarına göre analizler yapılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında klasik kam mekanizması ile yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular göz önüne alınırsa, düşük devirlerde volümetrik verimin iyi olmadığı, belli bir devirden sonrada volümetrik verimin artarak doğrusal bir eğri verdiği gözlemlenmiştir.

Analiz çalışmasında ise motorun CAD modelinin hassas bir şekilde elde edilmesi sayesinde sonuçların deney sonuçlarına yakınsadığı görülmüştür.

Analiz çalışmasının deneysel bir doğrulama yapıldıktan sonra istenilen doğrultuda sonsuz bir varyasyon vermesi ve deneysel çalışmaya göre hem maliyet hem de zaman açısından tasarruf sağladığı için önemi bu çalışmadan anlaşılmaktadır.

1. Deneysel çalışmada olduğu gibi analiz çalışmasında da 1600-2200 dev/dak aralığında volümetrik verimin %60-%70 aralığında olduğu görülmüştür. EMS kullanılması durumunda ise standart supap zamanlamasına göre %1-3 arasında değişen bir iyileşme görülmektedir. Emme supabının açılmasının erkene alınması ve kapanma zamanının aynı olması durumunda ise verimin klasik kam mekanizmasına göre kötüleştiği görülmüştür. Egzoz supabının kapanmasının 5 derece erkene ve 5 derece geçe alınması durumunun volümetrik verimi düşürdüğü, fakat emme supabının erkene alınması kadar etkisi olmadığı sonuçlardan anlaşılmıştır.

2. Deneysel çalışmada ölçülen ve analiz çalışması sonuçlarında da görüldüğü üzere supap bindirme esnasında silindir içi basınçta artışı meydana gelmektedir. Bunun nedeni ise kütleli hava debisi grafiklerinden anlaşılmaktadır. Supap bindirmesi esnasında egzoz supabının kapanma gecikmesinin az olması ve emme supabı açılma avansının olmaması nedeniyle, silindir içi basıncın artması ve manifold basıncının düşük olması sonucu havanın ters akışı, yani emme manifoldundan dışarıya doğru akışından kaynaklanmaktadır. EMS sisteminde supap akış kesitinin klasik kam mekanizmasına göre daha hızlı açılması sayesinde bu ters akışlar neredeyse tüm EMS durumlarında meydana gelmediği görülmüştür. Bu durumda EMS mekanizması kullanılmasının avantajlı olduğu açıktır.

3. Silindir içi karışım oluşumunun en önemli göstergelerinden biri olan yatay girdap değerinin ise tüm devirlerde maksimum 0,9-1 aralığında olduğu ve maksimum olduğu noktanın ise standart kam profiline göre emme supabının maksimum açık olduğu noktada olduğu görülmüştür. EMS sistemlerinde ise EmSA durumları için erken açılma zamanlarına göre yatay girdap değerinde çok az bir düşüş meydana geldiği ve maksimum olduğu noktanın daha erken olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Diğer yandan ise yatay girdap değerinin standart supap mekanizmasına göre çok fazla düşmediği ve emme supabının kapanmasına kadar

yatay girdap değerinin standart kam mekanizmasına göre yüksek seyrettiği görülmüştür. Yatay girdap oranının maksimum değerine, supap mekanizmasının değişiminin çok fazla etkisi olmadığı ve genel olarak manifold geometrisinin maksimum değere etkisi olduğu bilinmektedir. Yatay girdap değerinin maksimum olduğu noktayı ise EMS sistemi ile DSZ uygulayarak istenen KMA değerinde maksimum olması sağlanabilir.

4. Dikey girdap (Tumble x ve y) değerlerinin de erkene kaydığı fakat sayısal değerinin fazla değişmediği görülmüştür. Tumble x, EmSA durumları için sadece supap bindirme sürecindeki meydana gelen ani bir artışın standart kam mekanizmasına göre daha düşük seviyelerde gerçekleştiği görülmüştür. Tumble y, Standart kam profiline göre meydana gelen ters bir artış EMS mekanizmalı durumlarda görülmemektedir.

5. Deneysel çalışmada olduğu gibi analiz çalışmasında da 2400-3000 dev/dak aralığında volümetrik verimin iyileştiği görülmüştür. EMS kullanılması durumunda ise standart supap zamanlamasına göre %3-6,3 arasında değişen bir iyileşme görülmektedir. Emme supabının açılmasının erkene alınması durumunda ise verimin klasik kam mekanizmasına göre iyi olduğu fakat standart supap zamanlamalı EMS'ye göre iyi olmadığı görülmüştür. Egzoz supabının kapanmasının 5 derece erkene ve 5 derece geçe alınması durumunun volümetrik verimi arttırdığı özellikle 5 derece geçe alınması yani supap bindirmesinin arttırılması durumunda volümetrik verimin daha iyi olduğu sonuçlardan anlaşılmıştır.

6. Silindir içinde kalan hava kütlesi durumları incelendiğinde supap bindirmesinin etkisinin önemli olduğu anlaşılmaktadır. Supap bindirmesi esnasında emme supabının erken kapanıp egzoz supabın geç açılmasından kaynaklanan ve pistonun yukarı yönlü hareketi ve kam profiline göre akış kesitinin daralması nedeniyle silindir içerisindeki basıncın artışına sebep olmaktadır. Emme manifoldu basıncının düşük olması nedeniyle silindir içinde bulunan hava kütlelerinde ters akış meydana gelmektedir. Bu durum standart kam mekanizması ve EMS mekanizmasında devrin artması ile çok daha fazla etkisini göstermektedir Havanın ters akış etkisinden dolayı

volümetrik verim düşmektedir. Bunu önlemek için emme supabının AÖN'yi geçmeden kapatılması gerekmektedir.

7. Silindir içi hava akış hızları incelendiğinde ise supabın 1160, 1200 ve 1260 KMA değerlerinde alınan hız değerlerine bakıldığında genel olarak motor devrinin artması ile artan bir hava akış hızı trendi olduğu görülmüştür. Standart supap mekanizması ile EMS mekanizması hava akış görselleri için alınan KMA değerlerinde hava akış hızları arasında ciddi bir fark olmadığı görülmüştür. Fakat EMS sisteminde emme prosesi süresince hava akış hızlarının standart kam mekanizmasına göre çok fazla düşmediği görülmüştür.

8. EMS mekanizması kullanılması ile analiz sonuçlarında görüldüğü üzere volümetrik verimde artışı meydana geldiği görülmektedir. EMS ile değişken supap zamanlaması ve supap lifti uygulamasına dönüştürülmesi durumunda özellikle direkt enjeksiyonlu olmayan motorlarda karışım hazırlamada kullanılabileceği ve direkt enjeksiyonlu motorlarda ise içeri alınan havanın ısıtılması gibi durumlar için supap bindirmesinin ayarlanması gibi avantajlarından dolayı daha geniş bir yanma kontrolü sağlayabilmektedir.

9. Düşük devirlerde volümetrik verimin iyileştirilmesi için değişken supap kalkma miktarı uygulaması ve yüksek devirlerde ise daha fazla supap kalkma miktarı üzerine çalışmalar yapılabilir.

10. Supabın maksimum açılması için 3,6 ms tepkime süresi seçilmiştir. Bu sürenin volümetrik verime etkisi olabileceği düşünülmektedir ve bu sürenin artırılması veya azaltılması durumları üzerine de çalışmalar yapılabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>, Erişim Tarihi: 18.08.2017.
- [2] <http://www.epdk.org.tr/TR/Dokumanlar/Petrol/Mevzuat/Tebliğler>, Erişim Tarihi 10.08.2017.
- [3] <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVO Outlook2017.pdf>, Erişim Tarihi 10.08.2017.
- [4] Reinholz, B., A Cogging-Torque-Assisted Motor Drive for Internal Combustion Engine Valves. University Of British Columbia, School of Engineering, Electrical Engineering, Master of Applied Science, 2016.
- [5] Demir, E., Tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda elektromekanik supap uygulaması ve testi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [6] Birgül, N., İçten yanmalı motorlarda kullanılabilecek bir elektromekanik supap sisteminin tasarımı ve geliştirilmesi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2014.
- [7] Aygül, V., Tek silindirli buji ateşlemeli bir motorda elektromekanik supap mekanizması uygulaması. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [8] Uysal, F., Değişken Zamanlamalı Supap Kontrol Sistemi Tasarımı, İmalatı Ve Performansa Etkileri Üzerine Bir Araştırma, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [9] Taşlıyol, M., Elektro – Mekanik Denetimli Supap Sisteminde Değişken Supap Zamanlaması. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [10] Akbaş, A., Buji ile ateşlemeli motorlarda değişken supap zamanlamasının motor performansına etkileri. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2000.

- [11] Beauquel, J. A., Numerical investigation on the in-cylinder flow with SI and CAI valve timings, Loughborough University, Institutional Repository, Doctoral Thesis, 2016.
- [12] Horasan, M. S., Çift Döngülü Yanma Odalı Dizel Motorunun Silindir İçi Akışının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisan Tezi, 2010.
- [13] Sarıdemir, S., İçten Yanmalı Dört Zamanlı Bir Motor İçin Supap Mekanizması Tasarımı. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2009.
- [14] Savcı, İ. H., Computational Modeling of Cold Flow Characteristics of a Single Cylinder Internal Combustion Engine Using the Dynamic Moving Mesh, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [15] Seeman, P., Design of 120cc Single Cylinder Experimental Engine for Analysis of Intake Swirl and Multiple Ignition Sites. University of Miami, Mechanical & Aerospace Engineering, Master of Science 2009.
- [16] Qui, Y., Advanced Modeling, Control, and Design of an Electromechanical Engine Valve Drive System with a Limited-Angle Actuator. Massachusetts Institute of Technology, Electrical Engineering and Computer Science, Doctor of Philosophy, 2009.
- [17] Chladny, R. R., Modeling and Control of Automotive Gas Exchange Valve Solenoid Actuators. University of Alberta, Mechanical Engineering, Doctor of Philosophy, 2007.
- [18] Doğan, O., İçten Yanmalı Bir Motorda Elektro-mekanik Supap Uygulaması. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisan Tezi, 2006.
- [19] Sağıroğlu, S., Buji İle Ateşlemeli Bir Motorda Elektromanyetik Kumandalı Supap Mekanizmasının Tasarımı, İmalatı Ve Uygulanabilirliğinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2006.
- [20] Gün, F., Değişken Supap Zamanlamasının Motor Performansına Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [21] Chang, W. S., Parlikar, T. A., Seeman, M. D., Perreault, D. J., Kassakian, J. G., Keimy, T. A., A New Electromagnetic Valve Actuator, IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation, USA, pp.109–118. 2002.

- [22] Çınar C., Sekmen Y., Akbaş A., Erduranlı P., Buji İle Ateşlemeli Motorlarda Emme Supabı Kalkma Miktarının Performansa Etkileri Üzerine Bir Araştırma. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik. Bilimleri Dergisi.; Cilt:10(2), sayfa 179-184, 2004.
- [23] Kamaş Z. ve Yüksel İ., Elektromekanik Supap Mekanizmalarında Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt:9.2, sayfa 45–58, 2004.
- [24] Cope, D. and Wright, A., Electromagnetic Fully Flexible Valve Actuator. SAE Technical Paper 2006-01-0044, 2006.
- [25] Liu J. J., Yang Y. P., Xu J. H., Electromechanical valve actuation with hybrid MMF for camless engine, the 17th World Congr. Int. Federation on Automatic Control, Seoul, pp.611, 2008.
- [26] Gaeta A., Glielmo L., Giglio V., Police G., Modeling of an electromechanical engine valve actuator based on a hybrid analytical/FEM approach, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 13, no. 6, pp. 625-637, 2008.
- [27] Di Gaeta, A., Montanaro, U., Massimino, S., and Hoyos Velasco, C., Experimental Investigation of a Double Magnet EMVA at Key-On Engine: A Mechanical Resonance Based Control Strategy. SAE Int. J. Engines 3(2):352-372, 2010.
- [28] Wong, P. and Mok, K., "Design and Modeling of a Novel Electromechanical Fully Variable Valve System," SAE Technical Paper 2008-01-1733, 2008.
- [29] Chladny R. R., Koch C. R., Flatness-based tracking of an electromechanical variable valve timing actuator with disturbance observer feed forward compensation. IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 16, no. 4, pp. 652-663, 2008.
- [30] Ozdalyan B., Dogan O., "Effect of a semi electro-mechanical engine valve on performance and emissions in a single cylinder spark ignited engine", J. Zhejiang Univ. Sci. A, vol. 11, no. 2, pp. 106-114, 2010.
- [31] Gecim B., Raghavan M., Analytical and Experimental Assessment of Some Novel Variable-Valve-Actuation Mechanisms. Journal of Mechanisms and Robotics, Vol:2.2, 2010.
- [32] Chukwunke J. L., Achebe C. H., Okolie P. C., Anisiji O. E., Modelling Of Electromechanical Control of Cam Less Internal Combustion Engine. International Journal of Engineering and Mathematical Sciences, Vol. 3, Issue 1, pp.18-38, 2013.

- [33] Rezeki S. F., Seddik E. H., Abdelghaffar W. A., Fuzzy Control of a Moving Coil Electromagnetic Valve Actuator for an Automotive Camless Engine. *International review of automatic control*, Volume:7, Issue:4, pp:353-361, 2014.
- [34] Nikate C., Kotkar D., Malekar H., Dhumal K., 'Optimization of Valvetrain Mechanism for Three Cylinder Turbocharged Intercooled Gasoline Engine', *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, Volume:5.7, pp: 126–135, 2016.
- [35] Stiehl, R., Bode, J., Schorr, J., Krüger, C., Dreizler, A., Böhm, B., Influence of intake geometry variations on in-cylinder flow and flow–spray interactions in a stratified direct-injection spark-ignition engine captured by time-resolved particle image velocimetry. *International Journal of Engine Research*, Volume: 17(9), pp: 983-997, 2016.
- [36] B. Reinholz and R. Seethaler, "A cogging torque assisted motor driven valve actuation system for internal combustion engines," *Int. Des. Eng. Tech. Conf. Comput. Inf. Eng. Conf.*, Portland, USA, 2013.
- [37] Reinholz, B. A., Seethaler, R. J., Experimental Validation of a Cogging-Torque-Assisted Valve Actuation System for Internal Combustion Engines. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Volume: 21(1), pp: 453-459, 2016.
- [38] Bailly, O., Buchou, C., Floch, A., Sainsaulieu, L., Simulation of the intake and compression strokes of a motored 4-valve SI engine with a finite element code. *Oil & Gas Science and Technology*, Volume: 54(2), pp:161-168, 1999.
- [39] Johan, Z., Moraes, A. C., Buell, J. C., Ferencz, R. M., In-cylinder cold flow simulation using a finite element method. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Volume: 190(24), pp: 3069-3080, 2001.
- [40] Schernus, C., van der Staay, F., Janssen, H., Neumeister, J. et al., Modeling of Exhaust Valve Opening in a Camless Engine. *SAE Technical Paper 2002-01-0376*, 2002.
- [41] Gibson, A., Kolmanovsky, I., Modeling positive intake valve overlap air charge response in camless engines. In *American Control Conference*, 2003. *Proceedings of the 2003 (Vol. 1, pp. 755-760)*. 2003.
- [42] Laramee, R. S., Weiskopf, D., Schneider, J., Hauser, H., Investigating swirl and tumble flow with a comparison of visualization techniques. In *Proceedings of the Conference on Visualization'04*, pp. 51-58, 2004.

- [43] Sridhar, G., Paul, P. J., Mukunda, H. S., Simulation of fluid flow in a high compression ratio reciprocating internal combustion engine. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Volume: 218(6), pp: 403-416, 2004.
- [44] Garth, C., Laramée, R. S., Tricoche, X., Schneider, J., Hagen, H., Extraction and visualization of swirl and tumble motion from engine simulation data. In Topology-based Methods in Visualization, pp. 121-135, 2007.
- [45] Mahrous, A. M., Wyszynski, M. L., Wilson, T., Xu, H. M., Computational fluid dynamics simulation of in-cylinder flows in a motored homogeneous charge compression ignition engine cylinder with variable negative valve overlapping. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Volume: 221(10), pp: 1295-1304, 2007.
- [46] Kurniawan, W. H., Abdullah, S., Shamsudeen, A., A computational fluid dynamics study of cold-flow analysis for mixture preparation in a motored four-stroke direct injection engine. Journal of applied Sciences, Volume:7(19), pp:2710-2724, 2007.
- [47] Dinler, N., Yucel, N., Numerical simulation of flow and combustion in an axisymmetric internal combustion engine. In Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 22, 2007.
- [48] Mitianiec, W., Ziolo, T., Noga, M., Theoretical and experimental study of the ignition process in CNG direct injection SI engines. Journal of KONES, Volume:14, pp: 411-421, 2007.
- [49] Peng, Z., Jia, M., Full engine cycle CFD investigation of effects of variable intake valve closing on diesel PCCI combustion and emissions. Energy & Fuels, Volume:23(12), pp:5855-5864, 2009.
- [50] Martins, J., Teixeira, S. F. C. F., Coene, S., Design of an inlet track of a small IC engine for swirl enhancement. 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, Brazil, 2009.
- [51] Fengjun, G., Yingnan, G., Fafa, L., Xixi, P., Kaiyou, W., Honggang, J., Model control and transition of residual-affected HCCI engines by electro-hydraulic valve actuation system. 2nd International Conference In Advanced Computer Control (ICACC), pp. 503-508, 2010.
- [52] Jemni, M. A., Kantchev, G., Abid, M. S., Influence of intake manifold design on in-cylinder flow and engine performances in a bus diesel engine converted to LPG gas fuelled, using CFD analyses and experimental investigations. Energy, Volume: 36(5), pp: 2701-2715, 2011.

- [53] Rezaei, R., Pischinger, S., Ewald, J., Adomeit, P., Numerical investigation of the effect of swirl flow in-homogeneity and stability on diesel engine combustion and emissions. *International Journal of Engine Research*, Volume: 13(5), pp.482-496, 2012.
- [54] Bari, S., Saad I., CFD modelling of the effect of guide vane swirl and tumble device to generate better in-cylinder air flow in a CI engine fuelled by biodiesel. *Computers & Fluids* Volume: 84, pp: 262-269, 2013.
- [55] Sushma, H., and K. B. Jagadeesha.; CFD modeling of the in-cylinder flow in Direct-injection Diesel engine, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Volume 3, Issue 12, pp: 1-7, 2013.
- [56] Güneş D., Horasan M. S., Full Cycle Cold Flow Analysis of the Effect of Twin Swirl Combustion Chamber Design in a Diesel Engine, *World Journal of Mechanics*, Volume 6, pp:109-117, 2016.
- [57] Lakshman, A., Karthikeyan, C. P., Padmanabhan, R.; 3D In-Cylinder Cold Flow Simulation Studies in an IC Engine Using CFD, 1.1 (2013), 1–5.
- [58] Z F Tian and J Abraham, ‘Development of a Two-Dimensional Internal Combustion Engines Model Using CFD for Education Purpose’, 20th International Congress on Modelling and Simulation, 2013, 1–6.
- [59] Pragya Mishra and Vishwanath Banskar, ‘Flow Simulation of an I. C. Engine in FLUENT, ANSYS 14. 0’, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*/ISSN: 2248-9622, 2014, 252–55.
- [60] Pathak Yogesh, R., D. Deore Kailas, M. Patil Vijayendra, In cylinder cold flow CFD simulation of IC engine using hybrid approach. *International Journal of Research in Engineering and Technology* Volume:3, pp: 16-21 2014.
- [61] Martinas, G., Cupsa, O.S., Stan, L.C. and Arsenie, A., Cold Flow Simulation of an Internal Combustion Engine with Vertical Valves Using Layering Approach. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015.
- [62] Biradar, B. C., Kumarappa S., Kandasamy S., Cold Flow Analysis of a Single Cylinder Four Stroke Direct Injection CI Engine and Analysis of Volume Fraction of Air Using CFD Technique. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume: 02 Issue: 06, pp. 1266-1272, 2015.
- [63] Rohith S., Naveen Prakash G. V., Cold Flow Simulation in an IC Engine. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Volume: 02 Issue: 07, pp.82–87, 2015.

- [64] Ajoko, T. J., Tuaweri, T. J., Analysis of Charge Motion on Inlet Port of Internal Combustion Engines Using CFD. International Journal of Recent Trends in Engineering & Research (IJRTER) Volume 02, Issue 10; pp.105-113 2016.
- [65] Pulkrabek, W. W.; Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine Second Edition, Pearson Education International, United State of America, 5-14, 1997.
- [66] <http://sismebot.com/wp-content/uploads/2015/12/4-zamanli-motor.jpg>, Erişim Tarihi: 20.07.2017.
- [67] [http://makina.beun.edu.tr/eskisite/akademik\\_kadro/dkucukali/motorlab.pdf](http://makina.beun.edu.tr/eskisite/akademik_kadro/dkucukali/motorlab.pdf), Erişim Tarihi: 20.07.2017.
- [68] <https://www.mechadyne-int.com/app/uploads/2015/05/the-impact-of-variable-valve-actuation-on-engine-performance-and-emissions.pdf>, Erişim Tarihi: 21.07.2017.
- [69] Erduranlı, P., Buji ile ateşlemeli tek silindirli değişken sıkıştırma oranlı bir motorun teorik simülasyonu, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2003.
- [70] [https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cstten\\_subap%C4%B1\\_motor](https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cstten_subap%C4%B1_motor), Erişim Tarihi: 15.04.2017.
- [71] Ahmad, T., Theobald, M., A Survey of Variable-Valve-Actuation Technology. SAE Technical Paper 891674, 1989.
- [72] Dresner, T., Barkan, P., A Review of Variable Valve Timing Benefits and Modes of Operation. SAE Technical Paper 891676, 1989.
- [73] Schechter, M. and Levin, M., Camless Engine. SAE Technical Paper 960581, 1996.
- [74] Tai, C., Tsao, T., Schörn, N., Levin, M., Increasing Torque Output from a Turbodiesel with Camless Valvetrain. SAE Technical Paper 2002-01-1108, 2002.
- [75] Parvate-Patil, G., Hong, H., Gordon, B., An Assessment of Intake and Exhaust Philosophies for Variable Valve Timing. SAE Technical Paper 2003-32-0078, 2003.
- [76] Sellnau, M., Rask, E., Two-Step Variable Valve Actuation for Fuel Economy, Emissions, and Performance. SAE Technical Paper 2003-01-0029, 2003.
- [77] <http://acl.kaist.ac.kr/research-2/camless-engine>, Erişim Tarihi: 28.07.2017.
- [78] Sturman Industries, The sturman digital engine, CA, USA, 2008.

- [79] Özsezen A. N., Aygöl V., İçten Yanmalı Motorlarda Supap Kontrol Mekanizmaları. Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 4.3, sayfa:15–22, 2012.
- [80] Liu L., Chang S., A moving coil electromagnetic valve actuator for camless engines. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, vol.1, pp.176-180, 2009.
- [81] <https://www.avl.com/documents/10138/2699442/FlowSonixAirFlyer>, Erişim Tarihi: 15.04.2016.





## ÖZGEÇMİŞ

Üsame DEMİR, 10.02.1988'de Fatih'de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2005 yılında Akşemsettin Lisesi'nden mezun oldu. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. 2010 yılında Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Ana Bilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği EABD Enerji Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamış ve 2013 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne görevlendirme ile geçmiştir. 2013 yılında başladığı doktora eğitimine Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve 1 çocuk babasıdır