



**Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Bir Motorda Elektromekanik
Değişken Supap Zamanlamasının Hava Akış
Parametrelerine Etkisinin Deneysel ve Teorik Olarak
İncelenmesi**

Program Kodu: 1001

Proje No: 114R058

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Mustafa ÇANAKCI

Araştırmacı(lar):

Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN
Yrd. Doç. Dr. Ali TÜRKCAN
Yrd. Doç. Dr. Ertan ALPTEKİN

Bursiyer(ler):

Arş. Gör. Volkan AYGÜL
Arş. Gör. Üsame DEMİR

MART 2018

ANKARA



ÖNSÖZ

Petrol kökenli yakıtların sınırlı kaynaklara sahip olması ve çevreyi kirletici etkisi motor üreticilerini daha verimli motorlar üretmeye zorlamaktadır. Bu nedenle içten yanmalı motorlarda yakıt tüketimi ve kirletici gaz emisyonunu azaltan sistemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Özellikle son yıllarda oldukça ilgi gören kamsız motor teknolojisinin kullanımı bu çalışmaların başında gelmektedir.

Bu proje kapsamında, klasik kamlı buji ateşlemeli bir motor elektromekanik supap kontrollü (kamsız) bir motora dönüştürüldükten sonra, belirli motor devirlerinde emme supabı çalışma parametrelerinin (açılıp-kapanma zamanı ve supap kalkış miktarı) optimizasyonu ile emme manifoldundaki hava akışı kontrol edilerek, volumetrik verimin tüm devirlerde maksimum seviyede tutulması hedeflenmiştir. Düşük devirlerde daha yüksek hava akış kararlılığı sağlanıp, yüksek devirlerde içeri alınan havanın hızı ve kinetik enerjisi gerekli supap zamanlamaları ile optimize edilmiştir. Ayrıca, çalışma parametrelerinin emme manifoldundaki akış üzerine etkisi sayısal yöntemle de (CFD) incelenmiştir. Bu bağlamda, bu projenin gerçekleşmesini sağlayan TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

İÇİNDEKİLER

1. ÖZET	1
2. ABSTRACT	3
3. GİRİŞ	5
4. LİTERATÜR ÖZETİ	7
5. GEREÇ VE YÖNTEM.....	13
5.1 Deney sistemi bileşenleri	14
5.1.1 Deney motoru	15
5.1.2 Elektrik motoru	16
5.1.3 Kontrol kartı ve sürücü devresi	16
5.1.4 Ultrasonik hava akış ölçer ve silindir gaz basınç sensörünün deney düzeneğine montajı	18
5.2 Elektromekanik supap mekanizması tasarımı ve imalatı	19
5.2.1 Yeni ESM tasarımı ve tasarım parametreleri	21
5.2.2 Tasarlanan 2.Tip ESM (Model 2)	23
5.2.3 Tasarlanan 3. Tip ESM (Model 3A).....	24
5.2.4 Tasarlanan 3. Tip ESM (Model 3B).....	29
5.3 CFD analizleri için bilgisayar modelinin hazırlanması	31
5.3.1 Motor silindir hacmi ve manifoldların 3 boyutlu CAD modelinin oluşturulması	32
5.3.2 HAD analizi için gerekli düzenlemelerin yapılması	35
5.3.3 Motor parametrelerinin belirlenmesi.....	35
5.3.4 Hacimlere ayırma ve isimlendirmelerin yapılması	37
5.3.5 Ağ yapısının oluşturulması	38
5.3.6 Ağ yapısı ayarları	39
5.3.7 Supap profili oluşturulması	40
5.3.8 Sınır şartlarının belirlenmesi	41
5.4 Ağ yapısı optimizasyonu	44
5.5 Klasik kam mekanizması ile yapılan motor testleri	46
5.6 Ultrasonik debimetre ile hava debisinin ölçülmesi	46
6. BULGULAR.....	48
6.1 Deneysel Verilerin Toplanması	48
6.2 Klasik Sistem Deney Sonuçları	48
6.2.1 Ultrasonik debimetreden elde edilen test sonuçları.....	50
6.2.2 Silindir basıncı ölçümleri	51
6.2.3 Emme ve egzoz manifoldu sıcaklıkları	52
6.2.4 Volumetrik verimin hesaplanması	53
6.3 Elektromekanik Supap Mekanizması (ESM) Deney Sonuçları	55
6.3.1 ESM emme supabı profili.....	56
6.4 CFD analiz sonuçları.....	62



7. TARTIŞMA / SONUÇ	86
8. KAYNAKLAR.....	89

TABLO ve ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Proje akış şeması	13
Şekil 2. Deney düzeneğinin prensip şeması	14
Şekil 3. Deney düzeneğinin genel görünümü (1.Yakıt Tankı 2.Elektrik Motoru 3.ESM 4. Kontrol ve Sürücü Devresi 5.ÜÖN Sensörü 6.Optik Sensör 7.Elektrik Motoru Sürücüsü 8.Enkoder 9.Motor Test Tezgahı)	15
Şekil 4. ESM sürücü ve kontrol devreleri (1. Kontrol Kartı, 2. Mosfet Sürücü Kartı, 3. IRFZ 540 Mosfet, 4. Fan)	17
Şekil 5. Mosfet sürücü kontrol sinyalleri	17
Şekil 6. ESM kontrol blok diyagramı	18
Şekil 7. Ultrasonik Debimetre	18
Şekil 8. Tasarlanan 1. tip elektromanyetik supabın 3 boyutlu modeli	19
Şekil 9. 1. Tip ESM (1.Emme Bobini, 2.Egzoz Bobini, 3.ESM Sabitleme Plakası, 4.Fan)	20
Şekil 10. ESM'nin dinamik modeli.....	21
Şekil 11. Sistemin simulink modeli.....	23
Şekil 12. 2. Tip ESM.....	24
Şekil 13. Model 3A	25
Şekil 14. Manyetik devre mesh yapısı ve kuvvet çizgileri.....	26
Şekil 15. Bir bobindeki akım/zaman grafiği	27
Şekil 16. Model 3A Hava Aralığı-Kuvvet grafiği	28
Şekil 17. Model 3A ESM (1.Kapatma Bobini, 2.Açma Bobini, 3.Hareketli Disk, 4.Yay, 5.Kaplin, 6.Mil, 7.Yay Kapakları).....	28
Şekil 18. Model 3A ve 3B Disk Tasarımları.....	29
Şekil 19. Model 3B	29
Şekil 20. 0,5 ve 3,5 mm hava aralığında diske etkiyen kuvvet çizgileri	30
Şekil 21. Model 3A ve 3B Hava Aralığı-Kuvvet Grafiği.....	30
Şekil 22. ESM'nin silindir kapağına montajı	31
Şekil 23. Motor üst bloğunun fotoğrafları	32
Şekil 24. Nikon K610 lazer tarama cihazı görüntüsü.....	33
Şekil 25. Inus Technology Rapidform-XOR yazılımı arayüzü.....	33
Şekil 26. Tarama sonucu motor üst bloğunun CAD modeli.....	34
Şekil 27. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İçin Gerekli Model	34
Şekil 28. ANSYS Workbench İY Motor arayüzü.....	35
Şekil 29. Test motorunun ilgili parametrelerinin girildiği kısım	36

Şekil 30. Klasik Kam Mili Profiline Bağlı Supap Kalkma Yüksekliği	36
Şekil 31. Modelin import edilmesi ve montaj esnasında dikkat edilmesi gereken husus.....	37
Şekil 32. Parçalara ayırma işlemi gerçekleştikten sonraki geometrinin görünümü	38
Şekil 33. Otomatik ağ yapısı parametrelerinin ayarlanması	39
Şekil 34. Genel ağ yapısı boyutu ve Analiz Başlangıç-Bitiş Zamanlaması	39
Şekil 35. Motorun standart zamanlaması için Ansys IC Engine modülüne göre supap profili	41
Şekil 36. Deneysel ve analiz ortamında emme manifoldu kesitleri	41
Şekil 37. Emme ve egzoz periyodu basınç grafikleri	42
Şekil 38. Ansys Forte Arayüzü.....	43
Şekil 39. Sınır koşulları	43
Şekil 40. Farklı global ağ boyutunun silindir içi basınca etkisi	44
Şekil 41. Farklı global ağ boyutunun kütleli hava debisine etkisi	45
Şekil 42. Test düzeneği	46
Şekil 43. Ultrasonik debimetrenin yapısı	47
Şekil 44. Data Toplama programı arayüzü.....	48
Şekil 45. Deney düzeneğinin şeması	49
Şekil 46. 800 dev/dk'da klasik emme supabı profili	49
Şekil 47. 1600dev/dk'da klasik emme supabı profili	50
Şekil 48. Motor devrine göre hava tüketimi	51
Şekil 49. Motor devrine göre maksimum silindir basınçları	52
Şekil 50. Krank açısına bağlı olarak silindir basınçları	52
Şekil 51. ESM'li test düzeneği	55
Şekil 52. 800 dev/dk'da ESM emme supabı profili	56
Şekil 53. 800 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği	57
Şekil 54. 1200 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği	58
.....	58
Şekil 55. 1200 dev/dk'da emme supabı kapanma zamanı standart zamanlamaya göre 15 KMA öne çekilerek elde edilen supap profili	59
Şekil 56.1600 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği	60
.....	60
Şekil 57. 2000 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği	61
.....	61
Şekil 58. 2400 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği	62
.....	62
Şekil 59. Deneysel çalışmadan elde edilen silindir içi basınç grafikleri.....	63
Şekil 60. Deneysel olarak ölçülen kütleli hava debisi	64

Şekil 61. Silindir içi basınç grafikleri.....	65
Şekil 62. Deneysel ve simülasyon kütleli hava debisinin devir ile değişimi.....	66
Şekil 63. Volumetrik verimin devir ile değişim grafiği	66
Şekil 64. Değişken Supap Zamanlaması ile Elektromekanik Supap Profilleri.....	69
Şekil 65.1120 KMA Emme supabı dinamik ağ yapısı görüntüleri	70
Şekil 66. 900 KMA Egzoz Supabı dinamik ağ yapısı görüntüleri.....	71
Şekil 67. 1160 KMA Silindir içi ve manifold hız dağılımı.....	73
Şekil 68. 1200 KMA Silindir içi ve manifold hız dağılımı.....	74
Şekil 69. 1260 KMA Silindir içi ve Manifold hız dağılımı.....	75
Şekil 70. Silindir içindeki hava miktarının değişimi.....	77
Şekil 71. Silindir içi basınç grafiği	79
Şekil 72. Yatay girdap (Swirl Ratio)	80
Şekil 73.Dikey girdap (Tumble) x.....	81
Şekil 74. Dikey girdap (Tumble) Y	83
Şekil 75. Silindir içinde kalan toplam kütle	84
Şekil 76. Volümetrik verim değişimi	85
Tablo 1. Test motorunun teknik özellikleri.....	16
Tablo 2. Elektrik motorunun teknik özellikleri	16
Tablo 3. Tasarlanan 1. Tip ESM'nin özellikleri	20
Tablo 4. Model 2 Bobin özellikleri	24
Tablo 5. Model 2 Bobin Parametreleri	24
Tablo 6. Model 3A Bobin özellikleri.....	25
Tablo 7. Model 3A Bobin Simülasyon Sonuçları	26
Tablo 8. Motorun standart supap zamanlaması ve maksimum supap kalkma yüksekliği	40
Tablo 9. Analizlerde gerekli emme (giriş) ve egzoz (çıkış) hava sıcaklığı ve basıncı	45
Tablo 10. Silindire alınan ortalama hava kütlesi.....	50
Tablo 11. Emme manifoldu ve egzoz çıkış sıcaklıkları.....	53
Tablo 12. Test Şartlarındaki Ortam Hava Değerleri	54
Tablo 13. Volumetrik Verim Değerleri	55
Tablo 14. ESM ile Yapılan Test Sonuçları	57
Tablo 15. 1200 dev/dk'da elde edilen test sonuçları	58
Tablo 16. 1600 dev/dk'da elde edilen test sonuçları	59
Tablo 17. 2000 dev/dk'da elde edilen test sonuçları	60
Tablo 18. 2400 dev/dk'da elde edilen test sonuçları	61



Tablo 19. Deneysel çalışmadan elde edilen emme (giriş) ve egzoz (çıkış) hava sıcaklığı ve basıncı değerleri.....	63
Tablo 20. Kütleli hava akış debilerinin deneysel ve analiz verileri	67



1. ÖZET

İçten yanmalı motorlarda kullanılan klasik supap zamanlamasında, motorun belli bir devri ve yükü göz önüne alındığından, silindire alınan hava miktarı, motorun geçiş devirlerinde ve değişik devir aralıklarında yetersiz kalmaktadır. Bu durum, motorda volumetrik verimin azalmasına ve egzoz emisyon salınımının artmasına neden olmaktadır. Bilindiği üzere, motor performansına etki eden en önemli parametrelerden birisi volumetrik verimdir. Volumetrik verime etki eden parametreler olarak; atmosferik şartlar, silindir içi termodinamik özellikler, hava akış alanı, motor devri, emme supabının açılma-kapanma zamanları, supap kalkma miktarı vb. gösterilebilir. Bu projede, bu parametrelerden emme supap zamanlamasının volumetrik verim üzerine etkisi deneysel ve üç boyutlu model üzerinden incelenecektir. Deneysel olarak, klasik kamlı buji ateşlemeli bir motor elektromekanik supap kontrollü (kamsız) bir motora dönüştürülmüştür.

Bu çalışmada, motorun belirli devir aralıkları için emme supabının çalışma parametrelerinin (emme supabının açılıp-kapanma zamanı ve supap kalkış miktarının değişimi) optimizasyonu ile motorun düşük ve yüksek devirleri arasında emme manifoldundaki akışın kontrolü sağlanarak, volumetrik verimin tüm devirlerde maksimum seviyede tutulması sağlanmıştır. Düşük devirlerde daha yüksek hava akış kararlılığı sağlanıp, yüksek devirlerde içeri alınan havanın hızı ve kinetik enerjisi gerekli supap zamanlamaları ile optimize edilmiştir.

Bu projede supap çalışma parametrelerinin, emme manifoldundaki akış üzerine etkisi deneysel ve sayısal yöntemlerle (CFD) incelenmiştir.

Proje iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada (deneysel aşama), klasik kam miline sahip bir benzinli motor elektrik motoruna bağlanarak, yanmasız (motorize) bir ortamda, motorun belli devirleri (1000-3000 dev/dk) arasında emme manifoldundaki kütleli hava debisi ölçülmüştür. Daha sonra, aynı motor, elektromekanik supap kontrollü motora çevrilerek, kamsız motor sistemi ile testler yapılmıştır. Elektromekanik supap sistemi, bir mikro kontrolör devresi tarafından kontrol edilerek, klasik motor için tanımlanan sabit devir şartlarında, emme supap zamanı ve supap kalkış miktarı değişiminin kütleli hava debisi üzerine etkisi incelenmiştir. Her bir emme supap zamanlaması ve supap kalkış miktarı değişimi için elde edilen kütleli hava debisi klasik motor verileri ile karşılaştırılmıştır. Projenin ikinci aşaması ise, atmosferik şartlar, supap zamanlaması ve kalkış miktarı, motor tasarımı kullanarak modelleme çalışmasının yapılmasıdır. Klasik kam ve kamsız sistem ile deneysel olarak yapılması planlanan valf zamanı denemeleri ile eş zamanlı olarak bilgisayar



destekli akışkan dinamiği (CFD) tabanlı bir bilgisayar programında analizler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Motor, Kamsız Motor, Elektromekanik Değişken Supap Zamanlaması, Volumetrik Verim, CFD Analiz



2. ABSTRACT

The amount of air taken into the cylinder is insufficient at transient engine speeds and different speed ranges for valve timing using in conventional internal combustion engines because a certain engine speed and load are considered. This leads to a reduction in the volumetric efficiency of the engine and an increase in exhaust emissions. As known, volumetric efficiency is one of the most important parameters that influence the engine performance. The parameters affecting the volumetric efficiency include atmospheric conditions, the thermodynamic properties in the cylinder, the air flow area, engine speed, intake valve opening and closing times, the amount of valve lift and etc. In this project, the effects of intake valve timing on volumetric efficiency examined with the experimental and modeling results. In the experiments, the spark ignition engine with classical cam controlled engine converted to the electromechanical controlled camless engine.

In this study, the intake valve operating parameters (the valve opening and closing timing and valve lift) for certain engine speed ranges with the optimization which is provide with the engine's intake manifold flow by way of controlled between the low and high engine speeds, linear course of volumetric efficiency (close to ideal) tried to be obtained. Stability higher airflow at low engine speed is established and the air velocity and kinetic energy at high engine speed are being optimized with intake valve timings.

In this project, the effect of operating parameters of the valve on airflow in intake manifold examined with use of the experimental and numerical methods.

This project realized in two stages. In the first stage (experimental), by connecting the spark ignition engine with the classic camshaft to an electric motor, the mass airflow rate at the intake manifold measured at unfired (motorized) conditions for certain engine speeds (1000-3000 rpm). Obtaining the mass airflow quantities with use of conventional spark ignition engines considered the reference for variable valve timing work. Then, the same spark ignition engine is converted to the engine with the electromechanical variable valve timing; camless engine system obtained. Electromechanical valve system was controlled by a microcontroller circuit at same constant engine speed conditions which are defined at the classic spark ignition engine and the effects of changing the intake valve timing and valve lift on the mass airflow were examined. The obtained mass airflow rate values by changing for each intake valve timing and valve lift compared with conventional engine values. In the second stage of the project, the modeling work is done by using the input values of the air properties, intake valve timing, valve lift, the mass airflow, volumetric efficiency etc.



Experimental data measured by a conventional cam and camless systems analyzed the computer program based on computer-aided fluid dynamics (CFD).

Keywords: Single Cylinder Spark Ignition Engine, Camless Engine, Electromechanical Variable Valve Timing, Volumetric Efficiency, CFD Analysis



3. GİRİŞ

Günümüz taşıtlarında kullanılan içten yanmalı motorlar, uzun yıllar boyunca yapısal olarak önemli bir değişim geçirmeksizin, yanma odası tasarım değişiklikleri ile motor performansında ve egzoz emisyon değerlerinde iyileşmeler sağlanmaya çalışılmıştır. Kam milinin supap zamanlamasını doğrudan etkilemesinden dolayı, supap zamanlamasının motor performansını artırıcı yöndeki potansiyeli, hiçbir zaman tam olarak kullanılamamıştır. Kam mili kullanan değişken supap zamanlama sistemleri, motor performansında önemli iyileşmeler sağlasalar da sonsuz değişkenlikteki bir supap zamanlaması sağlayamazlar. Dolayısı ile mekanik sistemler, supap zamanlamasının motor performansını artırıcı yöndeki potansiyelini her bir motor devri için yüzde yüz kullanamazlar. Sonsuz değişkenlikte bir supap zamanlaması sağlamak için kam milinin kullanılmadığı ve kamsız motorlar olarak adlandırılan, elektromekanik kontrollü supap sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Basit bir ifade ile supaplar motorun nefes alıp vermesini sağlayan elemanlardır. İçten yanmalı motorlarda klasik supap zamanlaması kamın şekline ve kam mili loplara bağlıdır. Klasik sistemlerde kam lop açıları; motor momentinin maksimum olduğu bölge referans alınarak belirlenmektedir. Klasik kam kontrollü supap mekanizmalarının en önemli problemi, farklı motor devirlerinde silindire gerekli hava akışının sağlanamamasıdır. Ayrıca, her bir çevrimden sonra silindirde kalan inert gaz miktarındaki artış, yanma verimini olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden, motor devrinin düşük veya yüksek olduğu bölgelerde volumetrik verimde ve performansta kayıplar ortaya çıkmaktadır.

Bilindiği üzere, motor devri değişimi ile piston hızı, piston hızına bağlı olarak da içeri alınan dolgunun hızı ve kinetik enerjisi değişmekte, bu yüzden de supap zamanlamasının her bir motor devri için sürekli değişmesi gerekmektedir. Bunu sağlayabilmek için motor devrine göre emme supabının açılma-kapanma zamanını ve açılma miktarını değiştiren mekanizmaya sahip sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemler ile motor çalışma koşullarına olabildiğince mükemmel uyum sağlanarak, her devirde silindire alınan optimum dolgu miktarı ile yüksek performans elde edilebilecektir. Günümüz motor fabrikaları tarafından seri üretimi yapılan değişken supap zamanlı motorlar, supap kalkış miktarını ve zamanlamasını kam milini kontrol ederek gerçekleştirmektedir. Bu sistemlerdeki kam mekanizmaları ekstra kam loplara sahip olduğundan, motor geçiş devirlerine yeterince hızlı cevap verilememekte, gürültü oluşumu ve sürtünme kayıpları artmaktadır. Aynı zamanda, bu sistemlerin üretim ve bakım maliyetlerinin yüksek olması, uygulamada sınırlamalara yol açmaktadır.



Sonsuz değişkenlikte bir supap zamanlaması sağlamak için kam milinin kullanılmadığı ve kamsız motorlar olarak da adlandırılan, elektromekanik supap mekanizmalarına (ESM) ihtiyaç duyulmaktadır. ESM'lerin kullanılması halinde, kam miline, iticilere, itici çubuklara ve külbütör sistemine olan ihtiyaç ortadan kalkar. İçeri alınan dolgunun denetiminin tam olarak yapılabilmesi ile motor performansındaki artış daha üst düzeylere çıkarılabilir. İyi bir supap zamanlamasının gerçekleştirilmesi ile kirletici emisyon miktarlarını istenilen seviyelere çekmek mümkündür.

Değişken zamanlı supap mekanizmaları mekanik, hidrolik, elektro-pnömatik ve elektromekanik (elektromanyetik) sistemlerden oluşabilir. Ancak bu sistemlerden elektromekanik supap mekanizmaları nispeten diğerlerinden daha basit yapılı ve mevcut motor yapılarına daha kolay uyum sağlayabilmektedir. Ayrıca bu sistemle supabın açılıp kapanma zamanlaması ve açık-kapalı durumda kalma süresi motor hızı ve yüküne göre motor devrinden bağımsız olarak denetlenebilmektedir. Bunun sonucunda yakıt tüketimi azaltılabilir, motorda yüksek tork ve güç üretilebilir ve çevreye atılan kirletici gazlar azaltılabilir.

Bu proje de tasarlanan sürekli değişken elektromekanik supap sisteminin, volumetrik verimde iyileşmeler sağladığı görülmüştür. Ayrıca, bu sistemle sürtünme kayıplarında ve supap sistemini oluşturan mekanik parçalarda azalma sağlanmıştır. Değişken elektromekanik supap zamanlaması ile elde edilecek parametreler modelleme çalışmasının girdilerini oluşturmuştur. Klasik kam ve kamsız sistem ile ölçülen deneysel verilerin bilgisayar destekli akışkan dinamiği (CFD) programı ile analizleri gerçekleştirilmiştir.



4. LİTERATÜR ÖZETİ

Geçmişten günümüze motor üreticileri, motor performansında artış sağlamak ve daralan emisyon standartlarını yakalayabilmek için genellikle iki teknoloji üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu teknolojiler; yüksek basınçlı yakıt püskürtme ve değişken supap zamanlamasıdır. İki teknoloji üzerinde önemli çalışmalar olmasına rağmen, piyasa rekabetinden dolayı otomotiv üreticileri, üretim maliyetlerinde kısıtlama yapmak zorunda olduklarından, maliyeti kabul edilebilir teknolojiyi seri üretimlerine taşıyabilmişlerdir. İki konu üzerindeki Ar-Ge çalışmaları, her zaman gündemde olmasına rağmen, maliyet ve sürdürülebilirlik teknolojinin yaygın kullanımını engellemektedir. Bu proje kapsamında çalışılması düşünülen elektromekanik kontrollü supap teknolojisi de maliyet ve servis hizmetleri açısından problemlidir. Bu nedenle, önerilen proje de uygulanacak supap kontrol stratejisi ve oluşturulacak model ile Kocaeli ve çevresindeki otomotiv Ar-Ge merkezleri için referans bir çalışma olacağı düşünülmektedir.

Elektromekanik supap sisteminin kullanılması halinde, kam miline, iticilere, itici çubuklara ve külbütör sistemine olan ihtiyaç ortadan kalkar. İçeri alınan dolgunun denetiminin tam olarak eniyilenmesi ile motor performansındaki artış daha üst düzeylere çıkarılabilir. İyi bir supap zamanlamasının gerçekleştirilmesi ile kirlenici emisyon miktarlarını istenilen seviyelere çekmek mümkündür. Çünkü supap emisyonların iyileştirilmesi değişken supap zamanlamasının kabiliyeti dahilindedir.

Kamsız motor kavramı, kam mili olmaksızın supap sisteminin tahrik edilmesi anlamına gelir. 1899'lu yılların başlarından itibaren, kamsız içten yanmalı motor fikri kendine yer edinmeye başlamıştır. Aynı zamanda bağımsız bir supap kumanda denetleyicisinin motor gücünü önemli ölçüde artırabileceği de ifade edilmiştir. Daha sonraları ise güç artışına olan ilgi, yakıt tüketiminin iyileştirilmesine ve emisyonların azaltılmasına yönelmiştir (Gould ve ark., 1991).

Motor üreticileri seri üretimlerinde, motor performansını arttırmak için çoklu supap teknolojisi kullanmaktadır. Bu sayede her bir silindir için iki ya da daha fazla emme ve egzoz supabı kullanılarak her devirde silindir içerisine en fazla karışımın alınması hedeflenmektedir. Honda firmasının ilk olarak 1980'lerde geliştirmiş olduğu değişken supap mekanizması bu amaçla yapılan çalışmalardan birisidir. Honda'nın elektro-mekanik kontrollü değişken kam mekanizmasına sahip motorunda üç farklı kam profili bulunmaktadır. Bu tip motorlarda her bir kam, belirli bir motor devrinde optimum çalışma için tasarlanmıştır. Motor devrinin her değişiminde devreye giren kam değiştirme mekanizması çok komplekstir ve niteliği gereği hata yapma olasılığı yüksektir (Trevett, 2005).

Günümüzde kam mekanizması olmayan motorlar Ar-Ge bazında gelişme göstermektedir. Bu motorlarda kam yerini, kam mili olmayan mikro denetleyici kumandalı elektro-mekanik, elektro-manyetik, elektro-hidrolik veya elektro-pnömatik supap mekanizmaları almaktadır. Ancak, hidrolik ve pnömatik sistemler birtakım dezavantajlara sahiptir. Bunlardan hidrolik tahrik sisteminin dezavantajları; servo ve oransal valflerin yüksek maliyeti, yüksek doğruluğa sahip pozisyon transduserlerine olan ihtiyaç, yağ sıcaklığının motor performansını değiştirme üzerindeki etkisi, çok küçük silindirlerin bulunmasındaki zorluklar, sızıntılar, sistemin kire karşı hassasiyeti, akışkan gücü için lokal bir kaynak ihtiyacı ve sistem elemanlarında ortaya çıkan lineersizlik (non-linear) örneğin valf kilitlemeleri, asimetri, sızıntılar, vb.'dir. Pnömatik tahrik sisteminin dezavantajları ise; pnömatik sistemle kullanılan havanın yağlanma gereği, servo kontrollü hareket için havanın sıkıştırılabilir özelliğinden dolayı tepki zamanı gecikmeleri, tahrik katılığının (rijitliğinin) azlığı, servo uygulamalarında direkt tahrikle kullanıldığında yüksek kararlılık özelliği olan (resolution) pozisyon transduserlerine olan ihtiyaç, servo valflerin sınırlı bulunabilirliği, yüksek doğrusal olmayan (non-linear) sistem elemanlarının servo kontrolü kompleks yapmaları vb.'dir (Taylor, 1997).

Son on beş yılda ise Aura, Siemens, FEV, Visteon, Delphi, Renault, BMW, Sturman Industries gibi bazı firmalar, kamsız olarak çalışan supaplara yönelik ciddi bir araştırma geliştirme çabasının içine girmişlerdir. Özellikle elektromekanik supaplarda FEV ve elektro-hidrolik supaplarda Sturman Corporation firmaları bazı eyleyici çalışmalarıyla ön plana çıkmışlardır. Elektromekanik supap denetimi ile ilgili bilgiler çok yakın zamanda başlamıştır. FEV Motorontechnik'te yapılan çalışmada, serbest salınımlı bir elektromekanik supap denetim mekanizması sunulmuştur (Krauter ve ark., 1992). Sistemin denetlenebilme kabiliyetinin yüksek olduğu, supap geçiş sürelerinin kısa olduğu bunun yanında, geleneksel supap sistemlerine göre güç gereksinimlerinin karşılaştırılabilir düzeyde olduğu ifade edilmiştir. Elektromekanik supap mekanizmaları üzerine yapılan çalışmaların bir kısmı sistemin tasarımı ve tasarım parametrelerinin incelenmesi ve statik dinamik karakteristiklerinin araştırılmasına yöneliktir. Elektromekanik supap zamanlaması ile supap hareketleri tüm çalışma şartlarında motorun devrinden bağımsız olarak denetlenebilir ve bunun sonucunda yakıt tüketimi ve kirlenici gaz oranları azaltılmış olur (Pischinger ve ark., 2000; Park ve ark., 2001; 2003a, 2003b; Nitu ve ark., 2005). Ayrıca, bu sistem ile yüksek tork ve güç çıkışı elde edildiği, motorun soğukta ilk çalışması ve ısınması, geçici durum ve rölanti çalışması için optimum yakıt tüketimi sağladığı ve pompalama kayıplarını en aza indirdiği öne sürülmektedir (Wang ve ark., 2000; Giglio ve ark., 2002).

Elektromekanik supap mekanizmaları üzerindeki çalışmalar daha çok yeterli ve güvenilir bir supap performansı sağlamaya yöneliktir. Elektromekanik supap mekanizmalarında; büyük bir yay kuvvetine karşılık supabın etkin hale getirilmesi için gerekli mıknatıs kuvveti, supapların açılma veya kapanma zamanı gibi değişkenler önemli etkenler arasında yer alır. Diğer önemli bir etken de supabın kapanma anındaki darbe hızı ve yüksek hızlarda ortaya çıkabilecek mekanik gürültü problemidir. İçten yanmalı bir motor için oturma veya kapanma hızları yaklaşık olarak, emme supabı için 0,2 m/s ve egzoz supabı için 0,3 m/s'dir (Chang ve ark., 2002). Sistemden kaynaklanan olumsuzlukların giderilmesi için modelleme ve denetleme üzerine çok çeşitli çalışmalar yapılmakta, farklı denetim yapıları kullanılmaktadır (Butzman ve ark., 2000; Hoffman ve ark., 2001'a; 2001b; 2003; Peterson ve ark., 2002a; 2002b; 2002c; 2004; Boccaletti ve ark., 2004).

Elektromekanik supaplı bir motorda yapılan deneylerde; iki adet yay, iki adet bobin ve bir adet daimi mıknatıs kullanılmıştır. Supap açık/kapalı pozisyonda iken, yaylardan biri supabı kilitleyen daimi mıknatısla birlikte sıkıştırılmaktadır. Manyetik akıyı azaltmak için aynı taraftaki bobinin uyarılmasıyla yaylar, supabın durgun pozisyondan itibaren harekete geçmesini sağlamaktadır. Supap diğer tarafa ulaştığında ise, daimi mıknatıs supabı kilitlemektedir. Açık-çevrim denetimi ile yapılan testler boyunca, elektro-manyetik olarak hareket ettirilen supapların oturma hızlarını 0,35-1 m/s arasında ölçülmüştür. 1500 1/min'e göre yapılan deneyde, geleneksel motorların supap oturma hızına göre oldukça yüksek sonuçlar elde edilmiştir (Theobald ve ark., 1994).

Değişken supap zamanlaması ile gerçekte silindire alınması istenen taze dolgu miktarını, motorun tüm devir ve yük şartlarında teorik olarak silindire alınabilecek dolgu miktarına yaklaştırmak mümkündür. Bunu sağlamak için motor üreticileri geçmişten bugüne çeşitli sistemler üzerinde çalışmalar sürdürmüşlerdir. Değişken supap zamanlaması sistemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- 1) Supap kalkma miktarı ve kam mili profili sabit, düşük ve yüksek devirler için iki ayrı açılma kapanma zamanlamasına sahip sistemler.
- 2) Supap kalkma miktarı ve kam mili profili sabit, bütün devir ve yük aralıkları için sürekli değişken açılma-kapanma zamanlamasına sahip sistemler.
- 3) Supap kalkma miktarı sabit, supap açılma profili ve açılma-kapanma zamanları sürekli değişken sistemler (Açılma profili genişliyor veya büzülüyor).

4) Supap kalkma miktarı, açılma profili ve açılıp kapanma zamanları sürekli değişken sistemler.

Bu sistemlerin dışında, düşük motor devirlerinde emme supabının açılmasını geciktiren veya kapanmasını erkene alan, böylece supap bindirme periyodunu kısaltarak rölanti kararlılığını, düşük devirlerde momenti ve volumetrik verimi arttıran yardımcı sistemler de kullanılmaktadır (Gray ve ark, 1988; Ahmad ve ark, 1989). İçten yanmalı motorlarda kullanılan bazı değişken supap zamanlaması mekanizmaları motor yükünü gaz kelebeği olmaksızın da kontrol edebildiği için gaz kelebeği etrafındaki kısılma kayıplarını da ortadan kaldırmaktadır. Gaz kelebeği ile yükün kontrol edildiği bir motorda, supap çalışma zamanı kontrolünün tam yük performansını, emisyonları ve rölanti çalışmasını olumsuz yönde etkilediğini belirtilmiştir. Ayrıca, kısmi yük şartlarında pompalama kayıplarında %40 azalma, motorun maksimum tork değerinde %1 lik kayıp ve orta yük şartlarında NO_x'de %24 azalma, hidrokarbon emisyonlarında ise değişim farkının olmadığını rapor etmişlerdir (Tuttle ve ark., 1980).

İçten yanmalı motorlarda supaplar kam mili yardımıyla açılıp kapanmakta, bu sistemler ile emniyetli bir supap performansı sağlanmaktadır. Sabit supap mekanizmasına sahip motorlarda seçilen supap zamanlaması, volumetrik verimi motorun en çok çalıştığı devir aralığına göre optimize ettiğinden, motor bu devir aralığının altında veya üstünde volumetrik verim açısından düşük verim değerleri ile çalışmaktadır. Motorun düşük ve yüksek devirlerinde birbirleriyle zıt özelliklere sahip olan parametreleri elde edebilmek için motorun çalıştığı tüm devir aralıklarında silindir içine alınan dolgu miktarını, tasarım sonucu ortaya çıkan belli bir devir aralığındaki dolgu miktarına yakın değerlere getirmek gerekmektedir.

Bazı araştırmacılar içten yanmalı motorlarda karışımın silindire girişini ve çıkışını kontrol eden aynı zamanda sızdırmazlık sağlayan emme ve egzoz supaplarının zamanlaması ve kalkma miktarının, motorun bütün devir ve yük aralıkları için optimize edilmesiyle başta volumetrik verimde olmak üzere, motor momentinde, çıkış gücünde, özgül yakıt tüketiminde ve egzoz emisyonlarında iyileşmeler görmüş, ayrıca motorun kullanılabilir devir aralığının arttığı sonucuna varmışlardır (Dresner ve ark, 1989; Safgönül ve ark, 1999; Hara ve ark, 1989).

Yapılan birçok çalışmada değişken supap zamanlamasının volumetrik verim üzerine etkisi incelenmiştir. Yüksek devirlerde geciktirilen emme supabı kapanma zamanının, volumetrik verimi arttırdığını belirtmiştir. Buna neden olarak piston üst ölü noktaya doğru harekete

başlamış olsa bile havanın sahip olduğu yüksek momentumun silindir içene hava şarjını sürdürmesini göstermiştir (Asmus, 1982).

Bazı araştırmacılar değişken supap kalkış miktarının ve açılma-kapanma zamanının silindir içi türbülans oluşumuna etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında motorun nefes alma prosesinin emme supabı kapanma zamanından oldukça etkilendiği sonucuna varmışlardır. Geciktirilen emme supabı kapanma zamanının yüksek devirlerde volumetrik verimi arttırdığı gibi düşük devirlerde de düşürdüğünü saptamışlardır. Yüksek volumetrik verimin elde edilmesi için supap kalkış miktarının ve supap açılma-kapanma zamanının kontrol edilebildiği sistemlerin kullanılmasının her zaman avantaj olacağını öngörmüşlerdir (Ham ve ark., 1991). Supap kalkış miktarını kontrolü ile hava-yakıt karışımını kontrol altına aldığı bir çalışmada supabın küçük kalkma miktarlarında türbülans oluşumunun arttığını ve sıvı yakıtın silindir içerisine girmesiyle muazzam bir atomizasyona uğradığı tespit edilmiştir. Buna neden olarak silindir içerisine doğru kanal boyunca ilerleyen sıvı yakıtın yüksek yüzey gerilmelerine maruz kalmasını gösterilmiştir (Stivender, 1968).

Başka bir çalışmada tek silindirli benzinli bir motor için elektromekanik supap mekanizması kullanılması durumunu üç farklı açıdan incelenmiştir. İlk olarak Matlab/Simulink yazılımıyla elektromekanik sistemde supabın açılması için yayı sıkıştırması gereken kuvvet ve bobinlerde ki gerekli enerjiyi belirlemiş ikinci olarak da 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 elektromanyetik supabın açık kalma süresini değiştirerek supapların açılması için gerekli kuvvetler belirlemiştir (Schernus ve ark., 2002). Diğer bir çalışmada kamsız motorların supaplarını bağımsız olarak kontrol ederek geniş bir motor devri aralığında tork ve yakıt verimliliğini en üst düzeye çıkarabileceği öne sürülmüştür. 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 0 boyutlu bir yazılım kullanarak sabit ve zamana bağlı olarak emme valfi kapanmasını geciktirerek supap bindirme süresini arttırmış ve elektromekanik supap profili oluşturarak bu profil sayesinde hava dolgusundaki ve içeride kalan gazlara etkisini incelemişler ve bu konuda daha detaylı çalışma yapılması gerektiğini önermişlerdir (Alex ve ark. 2003). Bu çalışmaların dışında değişken negatif supap bindirmesinin (NSB) homojen dolgulu sıkıştırılmalı ateşlemeli (HCCI) bir motorda Ansys Fluent yazılımını kullanarak yanmasız akış HAD simülasyonu çalışmalar yapılmıştır. Literatürden alınan deneysel verisi analiz çalışmasının doğruluğunu ispatlayarak devamında NSB 70, 90 ve 110 olması

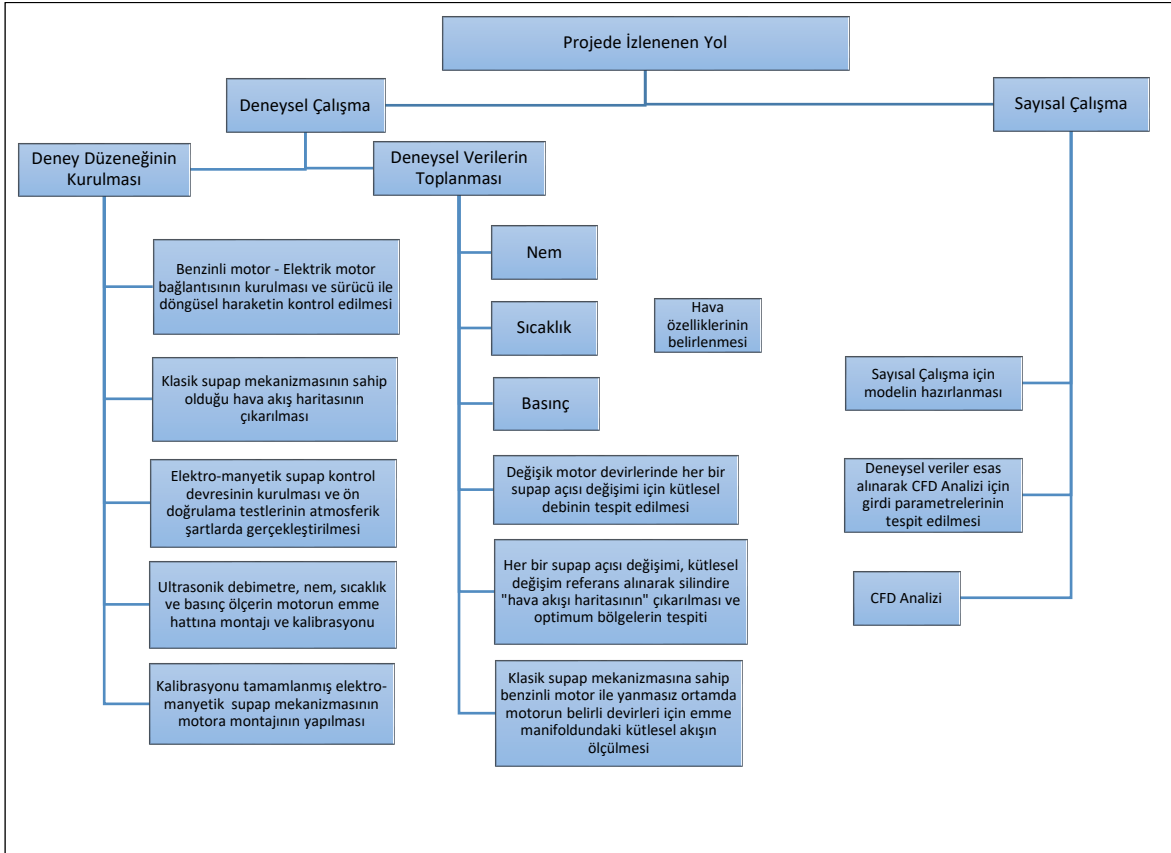


durumlarını incelenmiştir. Bunun için EmSK ve EgSA zamanları sabit tutulmuş ve EmSA ve EgSK zamanlarını değiştirerek gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları ile elde edilen sonuçlar, NVO'nun (negative valve overlap) büyüklüğünün bir sonucu olarak silindir içindeki hava dolgusunun hareketinin kuvvetinin ve küresel yönünün gözle görülür bir şekilde değiştirildiğini göstermektedir. Silindir içi yatay girdap (swirl) ve dikey girdap (tumble) hareketlerinin modifikasyonları, hava-yakıt karışımı hazırlama prosesinde ve sıkıştırma sonunda gerçek silindir içi koşullarda önemli bir etkiye NVO'nun daha yüksek sıcaklık dereceleri uygulanarak elde edilebileceğini belirtilmiştir. (Mahrous ve ark., 2007)

Yukarıda açıklandığı üzere, içten yanmalı motorlarda kullanılan Elektromekanik supap mekanizmaları elektronik kontrol ünitesine bağlı olarak denetlenen ve kam milini devre dışı bırakan bir teknolojidir. Supap zamanlamasının elektronik denetimi ile her bir devir için hava akış optimum düzeyde tutulabilir. Yasalarla tespit edilen egzoz emisyonlarının her geçen gün daha da aşağılara çekilmesi, değişken supap mekanizmalarının mekanik olarak oldukça karmaşık, hareketli çok sayıda parçadan oluşması, kam değiştirme mekanizmalarının çok kompleks ve niteliği gereği hata yapma olasılığının yüksek olması, kam mili olmayan supap mekanizmalarından elektro-hidrolik ve elektro-pnömatik supap mekanizmalarının yukarıda saydığımız dezavantajları, araştırmaları elektromekanik supap mekanizmalarına yöneltmiştir.

5. GEREÇ VE YÖNTEM

Proje deneysel ve sayısal olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Deneysel çalışmada deney düzeneğinin kurulması ve deney verilerinin toplanması amaçlanmıştır. Deney düzeneğinin kurulması aşamasında, öncelikle içten yanmalı tek silindirli 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. Yine bu aşamada farklı tiplerde elektromekanik supap mekanizmaları tasarlanmış ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Elektromekanik supap kontrol devresi kurularak, ön doğrulama çalışmaları atmosferik şartlarda gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılacak benzinli motorun supap mekanizması kaldırılarak, kalibrasyonu ve ön doğrulama testleri tamamlanmış elektro-manyetik kontrol mekanizmasının montajı yapılmıştır. Daha sonra elde edilen bu veriler ile CFD analizler gerçekleştirilmiştir. Tüm bu aşamalar ayrıntılı olarak aşağıdaki bölümlerde anlatılmıştır. Ayrıca projenin akış şeması da Şekil 1’de gösterilmiştir.



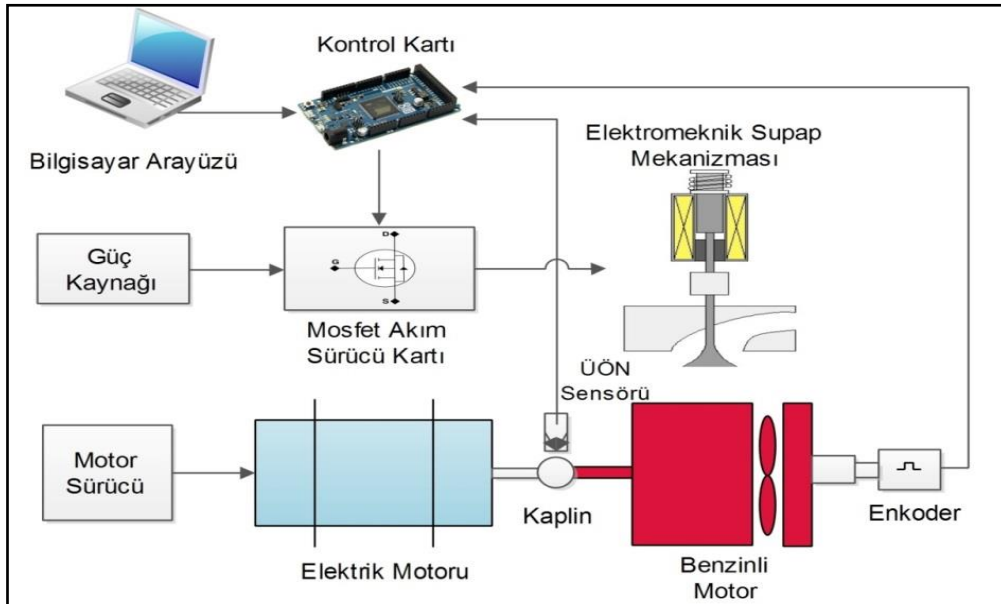
Şekil 1. Proje akış şeması

Bu kısımda, mevcut ve satın alımı tamamlanan deney sistemi bileşenleri kısaca tanıtılmış, deney düzeneğinin kurulması, supap düzeneğinin tasarımı ve deney sistemine monte edilmesi ve tasarımı tamamlanan Elektromekanik Supap Mekanizması (ESM) detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

5.1 Deney sistemi bileşenleri

Bu çalışmada kullanılan deney sisteminin bileşenleri; dört zamanlı-tek silindirli benzinli motor, elektrik motoru, elektrik motoru sürücüsü, elektromekanik supap mekanizması (ESM), elektronik kontrol kartı, bobin sürücü kartı, güç kaynağı, enkoder, silindir basıncı ve üst ölü nokta (ÜÖN) sensöründen oluşmaktadır. Deney düzeneğinin prensip şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.

Deney düzeneğinde kullanılan tek silindirli benzinli motorun tahriki için, bir elektrik motoru kaplin yardımıyla motora bağlanmış ve sistem test sehpasına sabitlenmiştir. Elektrik motorunu sürmek için de ABB marka 11 kW'lık motor sürücüsü kullanılmıştır. Krank açısı bilgisi için motorun krank mili çıkışına bir enkoder takılmıştır. Bununla birlikte, bir kontrol mekanizması olarak ÜÖN sensörü kalibrasyonu yapılarak elektrik motoru ve benzinli motor bağlantı noktasına irtibatlandırılmıştır.



Şekil 2. Deney düzeneğinin prensip şeması

Benzinli motora ESM montajını yapmak için motorun silindir kapağı ve kam mekanizması sökülmüştür. Silindir kapağı ve supap tasarımına uygun olacak şekilde ESM tasarımı yapılarak sistemin silindir kapağına yataklanması sağlanmıştır. Deney düzeneğinin genel görünüşü Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneğinin genel görünümü (1.Yakıt Tankı 2.Elektrik Motoru 3.ESM 4. Kontrol ve Sürücü Devresi 5.ÜÖN Sensörü 6.Optik Sensör 7.Elektrik Motoru Sürücüsü 8.Enkoder 9.Motor Test Tezgahı)

5.1.1 Deney motoru

Deneyisel çalışmada Honda GX 390 marka dört zamanlı-tek silindirli bir benzinli motor kullanılmıştır. Bu motora ait silindir kapağı ve supap mekanizmaları çıkarılarak ESM'nin silindir kapağına montajı yapılmıştır. Test motoru bir kaplin yardımıyla elektrik motoruna bağlanmıştır. Test motoruna ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Test motorunun teknik özellikleri

Motor tipi	4 zamanlı-üstten valfli-tek silindirli-yatay şaft
Çap x Strok	88 x 64 mm
Silindir hacmi	389 cm ³
Sıkıştırma oranı	8,0:1
Maksimum güç	13 BG @ 3600 dev/dk
Maksimum tork	2,7kgm @ 2500 dev/dk
Ateşleme sistemi	Elektronik ateşlemeli
Çalıştırma sistemi	Otomatik mekanizmalı / Elektrik marşlı
Yakıt kapasitesi	6,5 litre
Yakıt cinsi	Benzin
Soğutma sistemi	Hava soğutmalı

5.1.2 Elektrik motoru

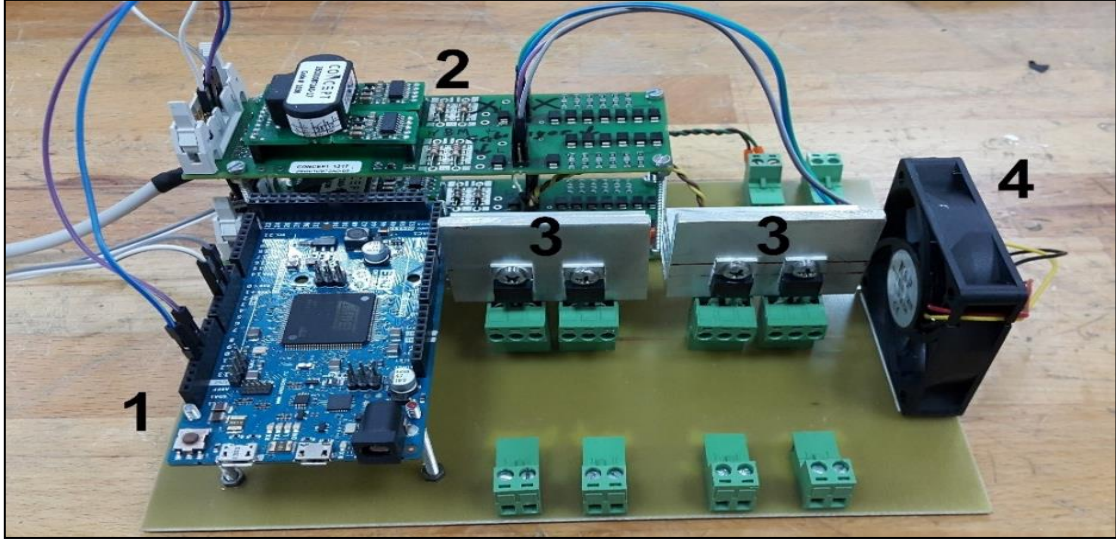
Test motoruna hareket vermek için bölüm laboratuvarımızda bulunan GAMAK marka elektrik motoru kullanılmıştır. Elektrik motorunu sürmek için ise 11 kW'lık ABB marka motor sürücüsü kullanılmıştır. Elektrik motorunun teknik özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Elektrik motorunun teknik özellikleri

Giriş gerilimi	380 V
Frekans	50 Hz
Hız	2960 dev/dk
Güç	7,5 kW

5.1.3 Kontrol kartı ve sürücü devresi

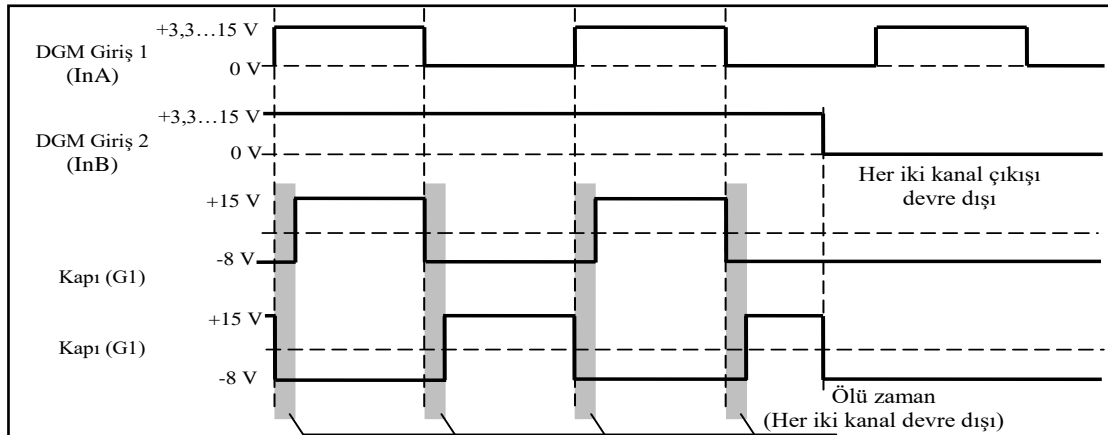
Bu projede, mikro-denetleyici devresi olarak Arduino DUE kontrol kartı kullanılmıştır. Kontrol kartı, enkoder ve ÜÖN sensöründen alınan verileri işlemesi ve bu verilere göre akım sürücü kartlarına sinyal göndermesi için mikrodenetleyici devresi Arduino program kodları yazılarak programlanmıştır. Kontrol kartı enkoderden aldığı açı bilgisine göre Mosfet sürücü devresine PWM (Darbe genişlik modülasyonu) sinyali göndererek mosfetin iletme geçmesini sağlamaktadır. Bu sayede her bir bobine akım sağlanmakta ve bir elektromanyetik kuvvet oluşmaktadır. Oluşan bu elektromanyetik kuvvet nüveyi (diski) çekmekte ve bu sayede emme veya egzoz supabı açılıp kapanmaktadır. Ayrıca bir bilgisayar arayüzü oluşturulmuş, emme ve egzoz supaplarının açılma ve kapanma zamanları bilgisayardan ayarlanarak farklı gerilimlerde (18-24 V) farklı supap açılma ve kapanma zamanlarına göre testler yapılmıştır. Bu testlerde bobinlere akım sağlamak için 30V-50A bir güç kaynağı kullanılmıştır. Ayrıca ESM'de bobinleri sürmek için bir mosfet sürücü devresi tasarlanmıştır. Kontrol ve sürücü devreleri Şekil 4'de gösterilmiştir.



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

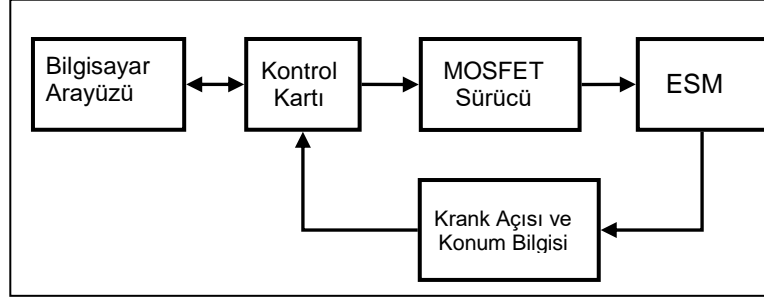
Kontrol sistemi tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri ile mosfetlerin sürülmesi için iki adet 2 kanal sürücü modül (CONCEPT 2SC0108T) kullanılmıştır. Bu çalışmada, mosfet sürücü direct modunda çalıştırılarak aynı kolda bulunan mosfetlerin anahtarlama sinyalleri üretilmiştir.

CONCEPT 2SC0108T sürücü modülleri, geliştirme kartları (CONCEPT 2BB0108T, 1200V çok seviyeli 2 kanal çıkışlı kart) kullanılarak üretilen sinyal çıkışları mosfetlere verilmektedir. Bu geliştirme bordu mosfetler için gerekli olan güvenlik önlemlerini içermektedir. Her bir mosfet için aşırı akım koruma, hata seviyesinde kapama, yarım köprü çalışma modunda gerekli ölü zaman aralıkları otomatik üretme ve tak-çalıştır özelliğine sahip bir karttır. Şekil 5'de Mosfet sürücü kontrol sinyalleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Mosfet sürücü kontrol sinyalleri

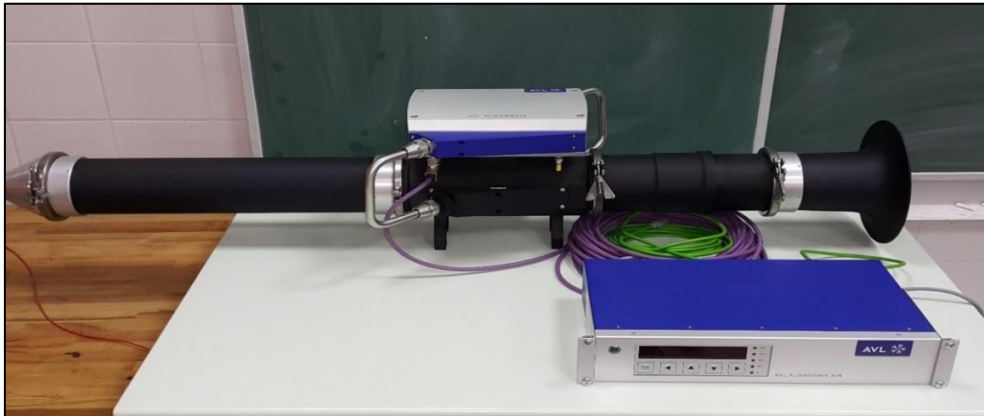
ESM'de enkoder ve ÜÖN sensöründen alınan açı bilgisine göre kontrol kartı mosfet sürücü kartlarına PWM sinyali göndermektedir. Bu sinyale göre sürücü kartı mosfetleri iletime geçirerek bobinlerin enerjilenmesini ve elektromanyetik kuvvetin oluşmasını sağlamaktadır. Böylece supaplar açılmakta veya kapanmaktadır. Sistemin kontrol blok diyagramı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. ESM kontrol blok diyagramı

5.1.4 Ultrasonik hava akış ölçer ve silindir gaz basınç sensörünün deney düzeneğine montajı

Projenin ilk 12 aylık döneminde alınması planlanan ancak yurtdışından alınacak olması ve kur artışından kaynaklanan problemlerden dolayı alımı zamanında gerçekleştirilemeyen ultrasonik hava kütle ölçer, silindir gaz basınç sensörü ve enkoder Ocak 2016 itibariyle alınarak sistemin kurulumu tamamlanmıştır. Ultrasonik debimetrenin motorun emme manifolduna uygun şekilde montajı yapılmış ve silindir içine alınan hava miktarı belirli devirlerde ölçülmüştür. Şekil 7'de deney düzeneğine yerleştirilmiş olan hava kütle ölçer (AVL Flowsonic 100) gösterilmiştir. Ayrıca silindir içi basıncını ölçmek için, motorun orijinal bujisi çıkarılarak yerine silindir basınç sensörü yerleştirilmiştir. Bu sayede krank açısına bağlı olarak her bir devirde silindir basınçları ölçülmüştür. Test sonuçları raporun alt bölümlerinde detaylı olarak verilmektedir.



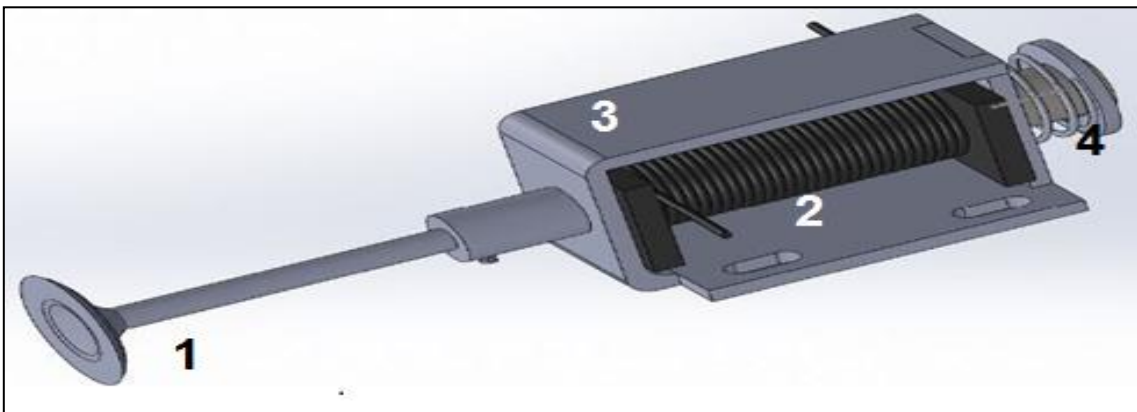
Şekil 7. Ultrasonik Debimetre

5.2 Elektromekanik supap mekanizması tasarımı ve imalatı

Elektromekanik supap tasarımında dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar bulunmaktadır. Selenoid bobinin sargılarından geçen akım, manyetik alan (elektromıknatis) meydana getirerek hareketli demir göbeği bobinin merkezine doğru çeker. Elektromıknatisin kuvvet hatları birbirlerini kesmezler ve en kısa yolu tercih ederek bir çekme veya itme kuvveti oluştururlar. Selenoid bobindeki manyetik alanın kuvvet hattı, kuzey (N) kutbundan çıkar ve güney (S) kutbuna doğru akar. Bobinde çekme kuvveti, manyeto-motor kuvvet (Amper x sarım) olarak ifade edilir. Selenoid bobinin verimli bir şekilde çalışabilmesi için hareketli diskin hareket edebileceği mesafe, göbeğin yarıçapını aşmamalıdır.

Proje kapsamında 3 farklı tip ESM tasarlanmıştır. Tasarlanan **1. Tip ESM**'de supaplar elektromanyetik kuvvet ile açılmakta ve yay kuvvetiyle kapanmaktadır. ESM'de, yay kuvveti ve diğer karşı kuvvetleri yenebilecek bir mıknatis devresinin kullanılması gereklidir. Bu sistemde supap elektromanyetik kuvvet ile harekete başladığından elektromanyetik kuvvetin büyüklüğü sistemde kullanılan yay kuvveti ve silindir içi basıncını yenecek büyüklükte olmalı, mıknatis devresi boyutları da bu kuvvete göre belirlenmelidir. Ayrıca, bu mıknatis kuvveti, yay kuvveti ve egzoz/emme manifoldu ve silindir arasındaki basınç farkının oluşturduğu değişken gaz kuvvetleri de yenebilecek büyüklükte olmalıdır. Kullanılan elektromıknatisin boyutları silindir kapağı üzerinde var olan alana göre tasarlanması gerekmektedir. Bu ve benzeri tasarım problemleri elektromıknatis tasarımıda hassasiyeti arttırmaktadır. Bu çalışmada, elektromanyetik supap mekanizmasında diskin hareket edebileceği mesafe 7 mm ve göbeğin yarıçapı 8 mm'dir.

Şekil 8'de elektromanyetik ESM yay kuvvetini ve silindir içi basıncını yenecek şekilde ve supap kapağına en uygun boyutlarda tasarlanan 1. Tip ESM'nin 3 boyutlu modeli gösterilmiştir. Tablo 3'de ise bobin özellikleri verilmiştir.

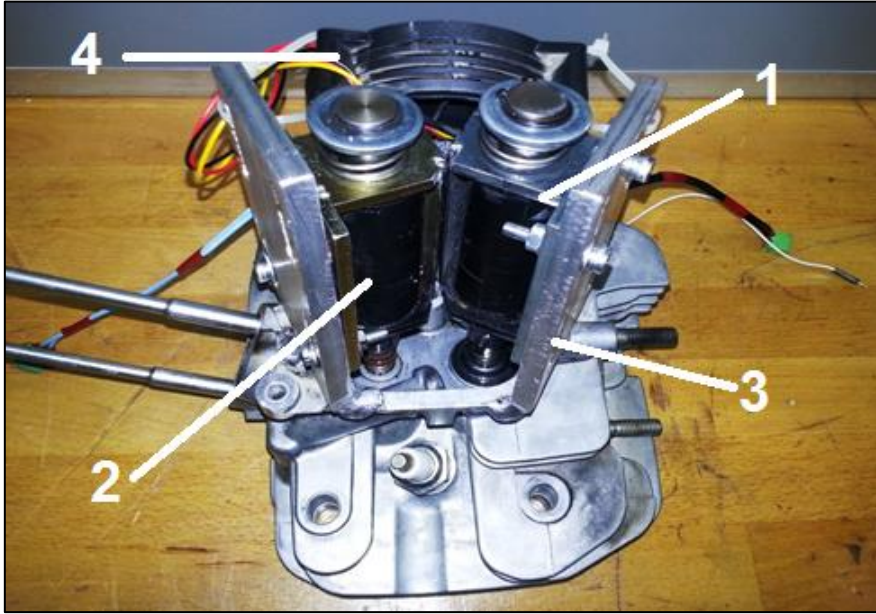


Şekil 8. Tasarlanan 1. tip elektromanyetik supabın 3 boyutlu modeli

Tablo 3. Tasarlanan 1. Tip ESM'nin özellikleri

Sarım Sayısı	650 sarım
Nüve Çapı	16 mm
Tel Çapı	0,65 mm
Bobin Uzunluğu	64 mm
Bobin direnci	3,2 Ohm

EMS mekanizmasının çalışması sırasında bobinlerden yüksek akım geçmekte ve bobinler ısınmaktadır. Bu nedenle bobinlerin soğutulması için sisteme fan eklenerek fazla ısınma engellenmiştir. Tasarlanan 1. Tip ESM'nin elektromekanik supap mekanizmasının silindir kapağına montajı Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. 1. Tip ESM (1.Emme Bobini, 2.Egzoz Bobini, 3.ESM Sabitleme Plakası, 4.Fan)

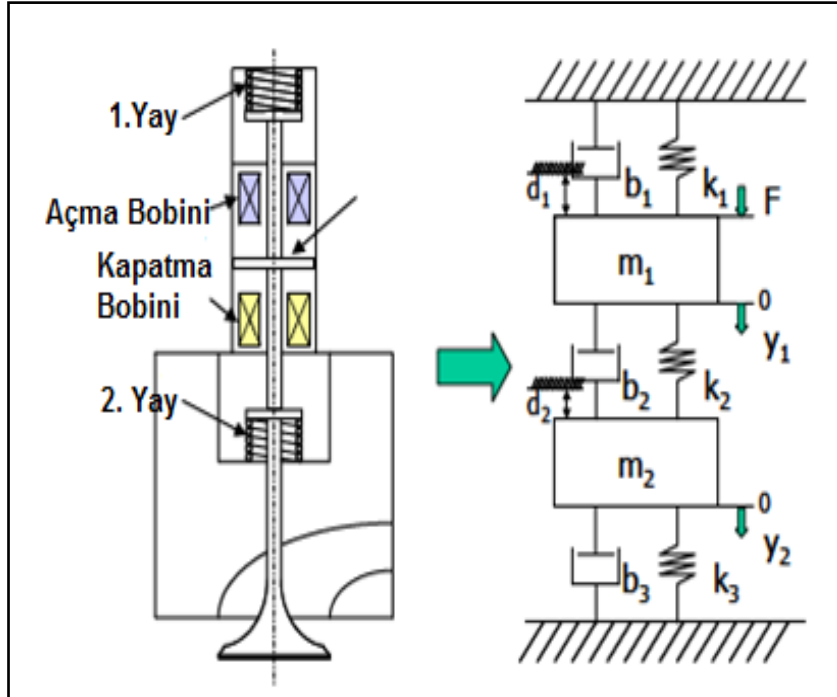
Proje önerisinde belirtilen supap mekanizması tasarımı imal edilmiş ve belirli devirlerde testler gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda; 1. Tip ESM modelinin 1200 dev/dk'ya kadar stabil şekilde çalıştığı, bununla birlikte motor devri yükseldikçe bobinin istenilen supap açma kapama frekansına cevap vermediği görülmüştür. Bobin sürücü devresinde farklı uygulamalar yapılmasına rağmen bu modelde yüksek motor devirlerinde tam manasıyla stabil çalışma sağlanamamıştır. Risk yönetimi tablosunda da belirtildiği üzere bobin tasarımında değişiklikler yapılmak suretiyle yüksek motor devirlerinde de çalışmaya uygun olacak farklı yapıda bobinler (disk tipi ve konik) tasarlanmıştır. Bu çalışmada bu tasarımlar 2. Tip ve 3. Tip olarak gösterilecektir.

5.2.1 Yeni ESM tasarımı ve tasarım parametreleri

Yukarıda da belirtildiği gibi proje önerisindeki bobin tasarımında değişikliğe ihtiyaç duyulmuş ve buna göre farklı tasarımlar yapılmıştır. Bu kapsamda farklı geometri (konik piston, düz yüzlü silindirik ve faturalı silindirik), farklı sarım sayıları ve tel çaplarına sahip 3 farklı bobin tasarımı incelenmiş ve analizleri yapılmıştır. Yeni tasarlanan ESM mekanizmaları (2., 3A ve 3B ESM modelleri) tasarım parametreleri Flux programında analiz edilerek karşılaştırılmış ve 3B Modelinin en uygun bobin tasarımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Manyetik devre boyutları, hareketli eleman geometrisi, hareketli eleman kütlesi, sarım sayısı, tel çapı, sistemin endüktansı gibi parametreler ESM tasarımına etki etmektedir. Bu nedenle, optimum ESM tasarlamak için bu parametrelerin en uygun değerlerde seçilmesi gerekmektedir. Tasarlanan modellerde bu parametreler değiştirilerek optimum tasarım hedeflenmiştir.

Sistemin dinamik denklemleri yay kütle ve damper sistemine benzetilerek bulunabilmektedir. Şekil 10'da sistemin dinamik yapısı ve bu durumda sistemin dinamik denklemleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 10. ESM'nin dinamik modeli

Dinamik denklem;

$$F_m = m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + F_{yay} + F_b \quad (1)$$

Burada;

- m : hareketli kütle [kg]
- b : sönüm katsayısı [N/(m/s)]
- F_m : mıknatıs çekme kuvveti [N]
- F_{yay} : yay kuvveti [N]
- F_b : basınç kuvvetidir [N].

Manyetik devrede kullanılan bir bobin, bir ortalama manyetik uzunluk (l) ve kesit alanına (A) sahiptir. Bobinin sarımlarından geçen akımın (I) selenoid bobin içinde oluşturduğu manyetik kuvvet hatlarına manyetik akı yoğunluğu denir ve birimi **Weber/m²** yani Tesla'dır. Burada; N bobindeki sarım sayısı olarak gösterilmiştir ve manyetik akı yoğunluğu (B), Denklem 2'de verilmiştir.

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad (2)$$

Endüktans, devrenin fiziksel düzeneğini ve manyetik özelliğini gösteren bir büyüklüktür ve L ile gösterilir ve birimi Henry'dir. Denklem 3'de endüktans, L ;

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Manyetik alan çizgileri, yalnız bobin içerisinde bulunacağından manyetik devreyi oluşturan manyetik malzemede bir sarımdan geçen manyetik akı ise Denklem 4'de Φ ;

$$\Phi = BA \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir ve birimi Weber'dir. Denklem 2, Denklem 4'te yerine yazılırsa bir sarımdan geçen manyetik akı Denklem 5'deki gibi ifade edilir.

$$\Phi = \mu_0 \frac{NI}{l} A \quad (5)$$

Bobinin toplam akısı ise Ψ ;

$$\Psi = N\Phi \quad (6)$$

olarak ifade edilir. Denklem 5, denklem 6 'da yerine yazılırsa bobinin toplam akısı;

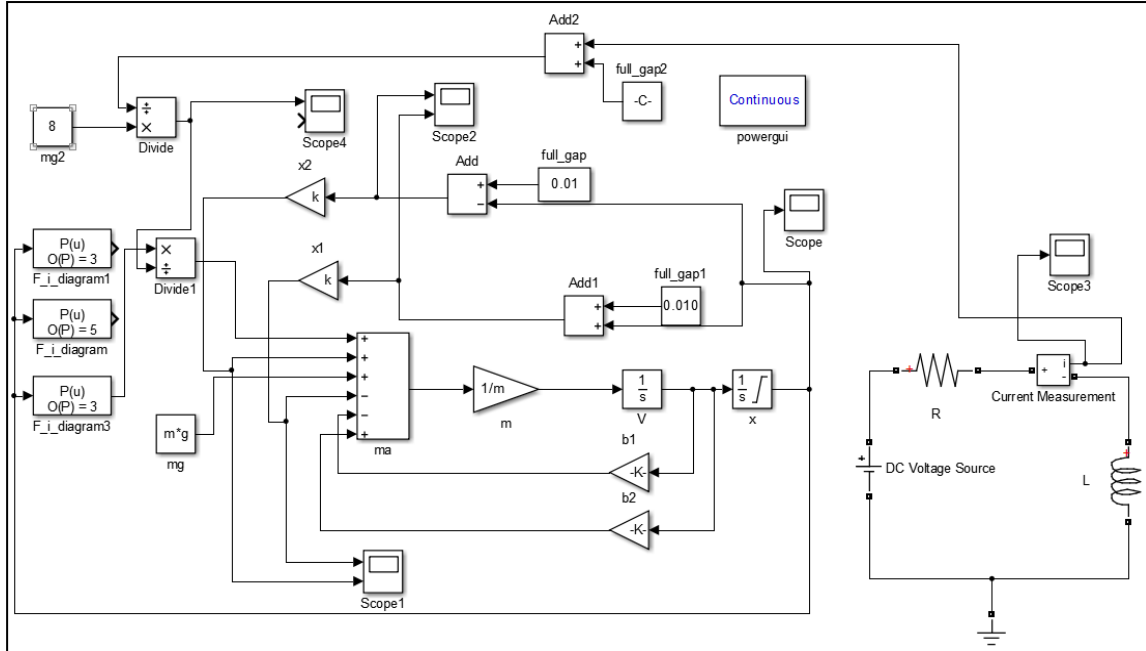
$$\Psi = N^2 \frac{\mu_0 A}{l} I \quad (7)$$

olarak yazılabilir.

Elektromanyetik sistemlerin tasarımında manyetik alanın, alandaki manyetik bir parçayı üzerine doğru **çekme kuvveti** Denklem 7'den yararlanılarak hesaplanabilir. Denklem 8'deki (-) işareti, kuvvetin hava aralığını azaltma eğilimini yani çekme kuvvetini, A ise hava aralığının kesit alanını ifade etmektedir.

$$F = -\frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (8)$$

Sistemin dinamik davranışlarını görebilmek için, bu denklemlerden yararlanılarak Matlab/Simulink 'de ESM modeli oluşturulmuştur. Şekil 11'de sistemin Simulink modeli verilmiştir.



Şekil 11. Sistemin simulink modeli

5.2.2 Tasarlanan 2.Tip ESM (Model 2)

Tasarlanan 2. Tip ESM'de (Şekil 12) konik piston tipi bobin tasarımı kullanılmıştır. Çekme yüzeyi konikleştirilerek kuvvet alanı artırılmaya çalışılmıştır. Bobinin boyutları Tablo 4'de

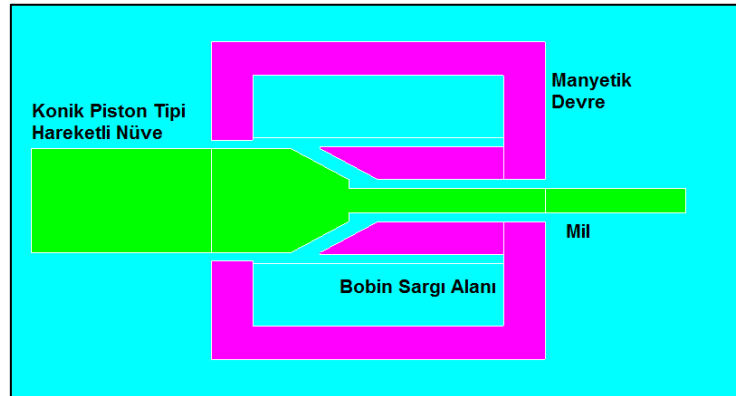
verilmiştir. Bu model 3D Flux programında analiz edilmiş ve çıkan sonuçlar Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 4. Model 2 Bobin özellikleri

Bobin Çapı	38 mm
Bobin Boyu	40 mm
Mil Çapı	4 mm
Piston Çapı	16 mm
Hava Aralığı	0,2 mm

Tablo 5. Model 2 Bobin Parametreleri

Ni [Amper Sarım]	Turn	Akım [A]	Kuvvet [N]	Endüktans [mH]	Tek Tel Kesit Alanı [mm ²]	Tek Tel Çapı [mm]	DC Kesit	Direnç Uzunluğu [m]	Direnç [Ohm]	Gerilim [V]	Zaman sabiti (L/R) [s]	Oturma Zamanı [s]
750	750	1	6	292	0,12	0,1528	0,9673	51,81	50,115	50,11	0,005826504	0,011653
750	250	3	6	32,44	0,36	0,4585	0,1075	17,27	1,856	5,56	0,017473506	0,034947
750	150	5	6	25,87	0,6	0,7643	0,0389	10,36	0,403	2,01	0,064081681	0,128163
750	75	10	6	2,92	1,2	1,5286	0,0096	5,18	0,050	0,50	0,058265043	0,11653
750	50	15	6	1,29	1,8	2,2929	0,0043	3,45	0,015	0,22	0,086094980	0,172190
750	37,5	20	6	0,73	2,4	3,0573	0,0024	2,59	0,006	0,12	0,116542134	0,233084



Şekil 12. 2. Tip ESM

5.2.3 Tasarlanan 3. Tip ESM (Model 3A)

Bu tasarımda (Model 3A) ESM için düz yüzü disk tipi mıknatıs devresi kullanılmıştır. Ayrıca, bu tasarımda supap hareketine yardımcı olmak için açma ve kapama devrelerine yay eklenmiştir. Hareketli elemanın (mil ve disk) hareketi, yayların depoladığı potansiyel enerji ve mıknatıs kuvveti ile sağlanmaktadır. Bu tip ESM'de, kontrol kartından gönderilen PWM sinyaline göre MOSFET sürücü devrelerinden biri iletime, diğeri kesime sokularak bobinlere

akım sağlanmakta ve bu sayede supap açılıp kapanmaktadır. Hareketli eleman yay kuvveti yardımıyla harekete başlamaktadır. Elektromanyetik kuvvet, hareketin başlamasına yardımcı olmak ve supabı açık veya kapalı konumda tutmakta etkili olmaktadır. Her iki bobine de akım uygulanmadığında disk yaylar yardımıyla denge konumunda supaplar ise yarı açık pozisyonda kalmaktadır. Bu tasarımda kullanılan manyetik devre boyutları Tablo 6'da verilmiştir. Bu model Flux programında analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir. Şekil 13'de ise Model 3A gösterilmiştir.

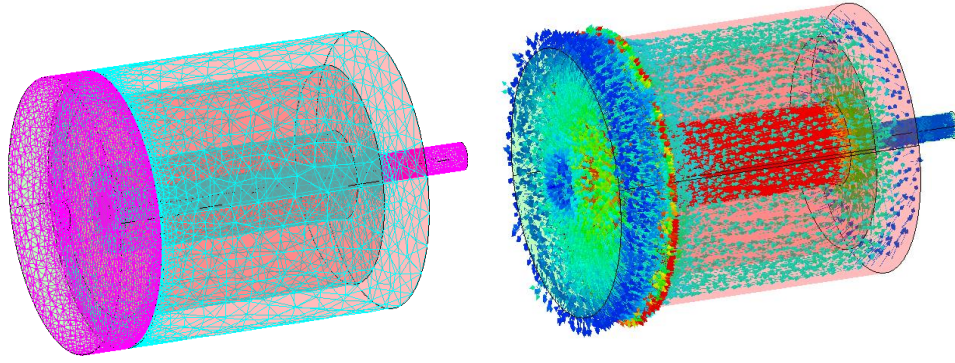
Tablo 6. Model 3A Bobin özellikleri

Bobin Çapı	38 mm
Bobin Boyu	40 mm
Mil Çapı	4 mm
Disk Çapı	38 mm
Hava Aralığı	0,2 mm

Şekil 14'de manyetik devrenin mesh yapısı ve diske etki eden manyetik kuvvet çizgileri gösterilmiştir. Şekildeki mesh yapısına göre analizler yapılmış ve manyetik devredeki akı yoğunlukları yine aynı şekilde gösterilmiştir. Buna göre manyetik devredeki akı yoğunluğunun sistemdeki iç çekirdekte ve disk ile oturma yüzeyi arasında yoğunlaştığı görülmüştür. Disk yanal yüzeylerinde ise kaçak akı kayıpları meydana gelmekte ve bu nedenle çekme kuvvetinde kayıplar oluşmaktadır.



Şekil 13. Model 3A



Şekil 14. Manyetik devre mesh yapısı ve kuvvet çizgileri

Tablo 7. Model 3A Bobin Simülasyon Sonuçları

Ni [Amper sarım]	Turn	Akım [A]	Kuvvet [N]	Endüktans [mH]	Tek Tel Kesit Alanı [mm ²]	Tek Tel Çapı [mm]	DC Kesit	Direnç Uzunluğu [m]	Direnç [Ohm]	Gerilim [V]	Zaman Sabiti [L/R]	Oturma Zamanı 5 τ
610	1220	0,5	6	577,29	0,097	0,124	1,393	84,27	117,398	58,69	0,004917	0,009835
610	813	0,75	6	256,57	0,146	0,186	0,671	56,18	37,700	28,27	0,006806	0,013611
610	610	1	6	144,32	0,195	0,248	0,348	42,13	14,672	14,67	0,009836	0,019672
610	407	1,5	6	63,94	0,292	0,372	0,154	28,09	4,348	6,52	0,014703	0,029406
610	305	2	6	36,08	0,390	0,497	0,087	21,06	1,833	3,66	0,019683	0,039366
610	203	3	6	16,03	0,585	0,745	0,038	14,04	0,547	1,64	0,029292	0,058585
610	153	4	6	9,02	0,780	0,994	0,021	10,53	0,229	0,91	0,039348	0,078697
610	122	5	6	5,77	0,975	1,242	0,014	8,42	0,117	0,58	0,049149	0,098298
610	61	10	6	1,44	1,950	2,485	0,0034	4,21	0,014	0,14	0,098198	0,196395
610	40,7	15	6	0,64	2,926	3,727	0,0015	2,80	0,004	0,06	0,145944	0,291888
610	30,5	20	6	0,36	3,901	4,970	0,0008	2,10	0,001	0,036	0,196395	0,392791

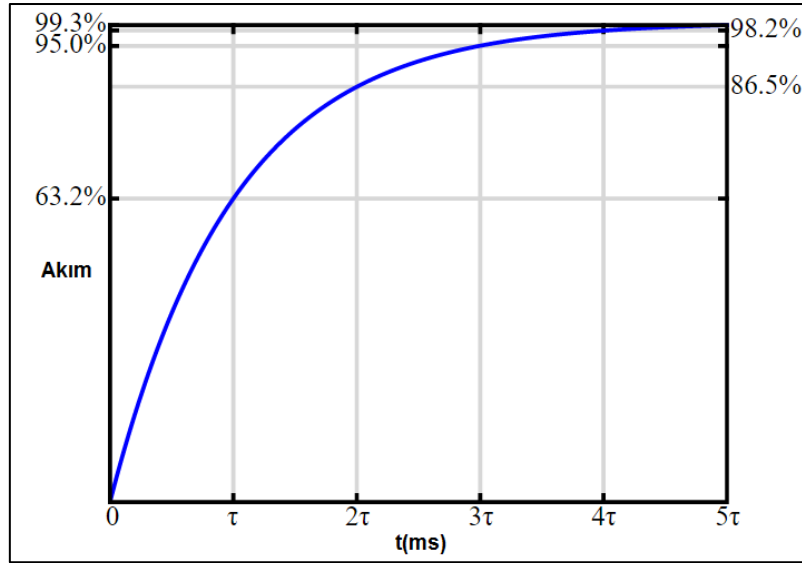
Elektromekanik supap mekanizmasının tasarımına etki eden parametrelerden biri de sistemin endüktans ve buna bağlı olarak da zaman sabiti değeridir. Sistemin endüktans değeri, bobinlerin dolma ve boşalma karakteristiklerini ve bu nedenle de ESM'nin çalışma aralığını etkilemektedir. Bobin endüktansı akım değişimini engelleyecek etki meydana getirdiği için bobin içinden geçen akım, ani değerler almamakta ve ancak zamanla değer değiştirmektedir. R/L devrelerinde depolanan enerjinin %63' lük kısmı için geçen süre zaman sabiti (τ) olarak ifade edilir. Bu devrelerde akım değerinin maksimum seviyeye ulaşması için ise 5τ luk bir süre geçmesi gerekmektedir. Aynı şekilde bobinde indüklenen akımın tamamen boşalması için de aynı miktarda süre geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle, ESM'nin yüksek devirlerde ve stabil çalışabilmesi için sistemin endüktans değerinin optimum seviyede olması gerekir.

Sistemin zaman sabiti değeri, bobin direnci (R) ve endüktansına (L) bağlıdır. Bu durumda zaman sabiti τ ;

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

olarak ifade edilir. Şekil 15'de bir bobindeki akımın zaman göre grafiği gösterilmiştir. Tüm bu ifadeler göz önüne alındığında sistemin zaman sabitinin küçük olması ESM'nin yüksek devirlerde çalışması için en önemli parametredir. Zaman sabitinin küçük olması da bobinin endüktans değerinin küçük, direnç değerinin ise büyük olmasına bağlıdır. Tablo 7'ye göre en düşük zaman sabiti 1. seçenekte belirtilmiştir. Ancak bu durumdaki direnç değerinin yüksek olması da gerilimi arttıracığından dolayı uygun bir seçim olmayacaktır.

Bu sebeple, Tablo 7'den ESM tasarımına göre optimum endüktans değeri tespit edilerek sistemin yüksek devirlerde çalışması amaçlanmıştır. 2 ve 3 boyutlu simülasyonlar sonucunda, 305 sarım sayısına sahip 0,5 mm çapında tel kullanılarak yapılan analizin optimum şartları sağladığı tespit edilmiştir ve bu değerlere göre ESM üretimi yapılmıştır.

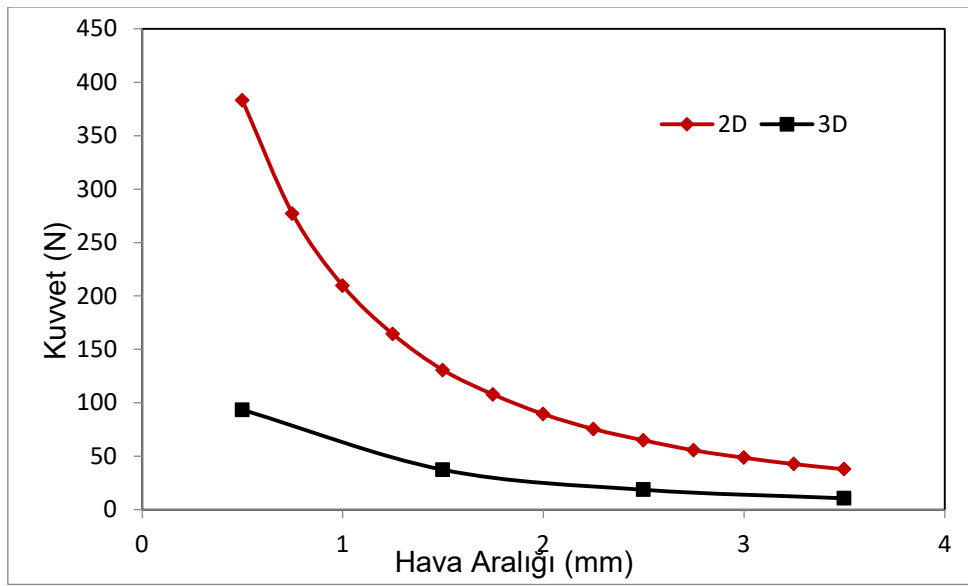


Şekil 15. Bir bobindeki akım/zaman grafiği

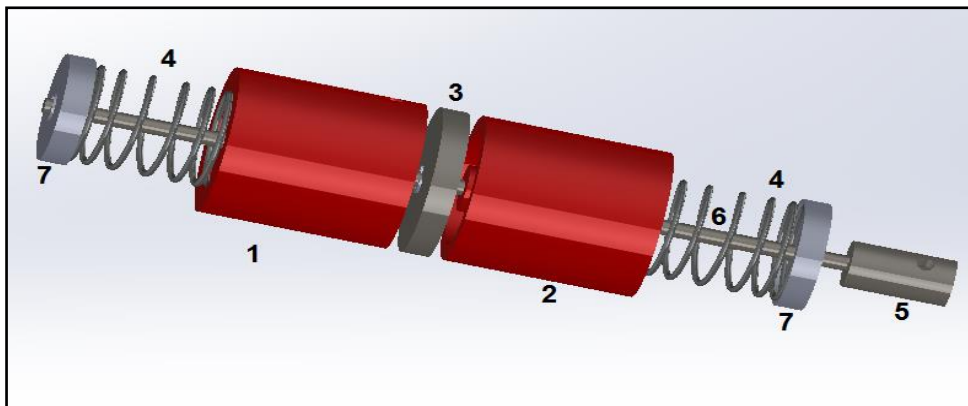
Bu modelin dinamik analizinde tüm sistemin endüktans değeri 7,95 mH olarak hesaplanmıştır. Optimum endüktans değerine sahip bobin kullanılarak elde edilen kuvvet-hava aralığı grafiği Şekil 16'da verilmiştir. 2 boyutlu analizde teorik hesaplamalar yapılmış ve kuvvet eğrisi elde edilmiştir. Ancak 3 boyutlu analizde kaçak akı kayıpları da hesaplandığı için gerçeğe daha yakın sonuçlar bulunmuş ve tasarım parametreleri buna göre belirlenmiştir. Teorik hesaplamalarda (2D analiz) disk mesafesi 3,5 mm'de iken oluşan

maksimum kuvvet 37 N iken 3D analizde bu değer kaçak akılardan dolayı 10,57 N'a kadar düşmektedir. Disk hava aralığı mesafesi 0,5 mm iken teorik hesaplamalarda 383 N olan kuvvet değeri 3D analizde 93 N olmaktadır.

Bu modelde mil çapının 4 mm olmasından dolayı ESM'nin çalışma şartlarına bağlı olarak sisteme etkileyen yatay kuvvetlerden dolayı milde eğilmeler tespit edilmiştir. Bu eğilmeler ESM'deki sürtünme kuvvetlerini arttırmış ve sistemde sıkışmalara neden olmuştur. Bu nedenle mil çapı 6 mm'ye çıkarılmıştır. Tasarlanan modelin 3 boyutlu modeli Şekil 17'de gösterilmiştir.



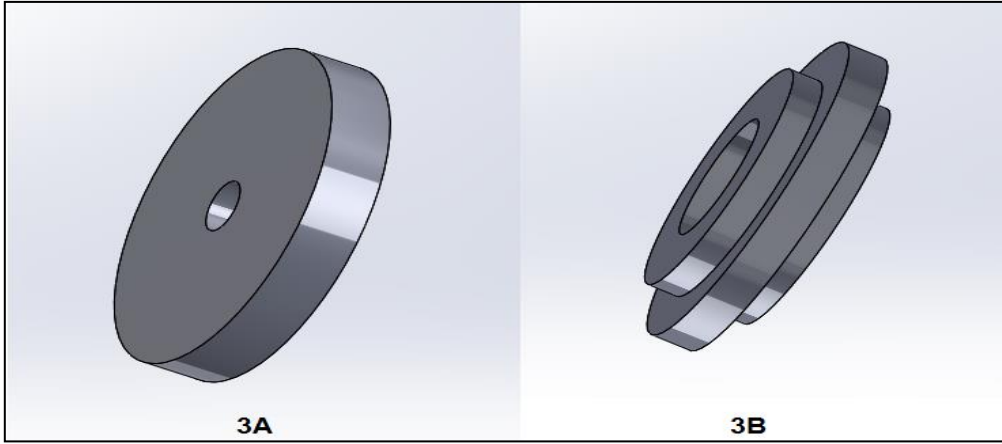
Şekil 16. Model 3A Hava Aralığı-Kuvvet grafiği



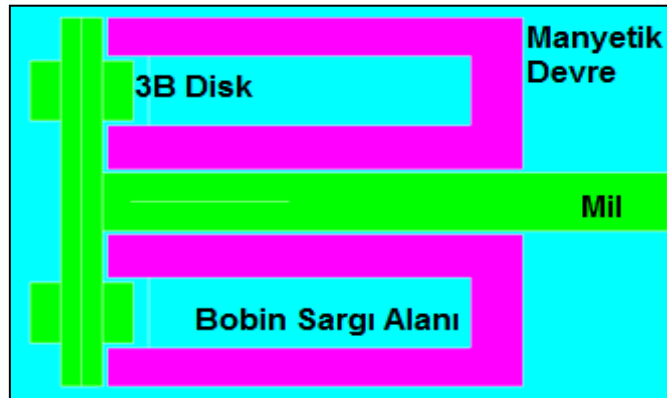
Şekil 17. Model 3A ESM (1.Kapatma Bobini, 2.Açma Bobini, 3.Hareketli Disk, 4.Yay, 5.Kaplin, 6.Mil, 7.Yay Kapakları)

5.2.4 Tasarlanan 3. Tip ESM (Model 3B)

ESM tasarımında kritik noktalardan biri de sisteme ilk hareketi verebilmek için gerekli olan elektromanyetik kuvvettir. Supapların 7 mm açılması düşünüldüğünde bu kuvvetin 3,5 mm'den sistemdeki karşı basınçları yenebilecek büyüklükte olması gerekmektedir. Bu nedenle disk tasarımı değiştirilerek sistemin 3,5 mm de daha fazla elektromanyetik kuvvet uygulaması sağlanmıştır. Bu nedenle tasarlanan yeni modelde 3A modelinden farklı olarak hareketli eleman disk modeli üzerinde değişiklikler yapılmıştır. 3A modelinde düz yüzlü silindirik bir yapı kullanılmış, 3B modelinde ise faturalı silindirik bir geometri kullanılmıştır. Bu durumda 3,5 mm'de kaçak akı kayıpları azaltılarak çekme kuvvetinin artması ve sistemin daha stabil çalışması sağlanmıştır. Şekil 18'de model 3A ve 3B'nin disk tasarımları gösterilmiştir. Model 3B'nin Flux programında 2D ve 3D analizleri yapılmış ve çıkan sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.



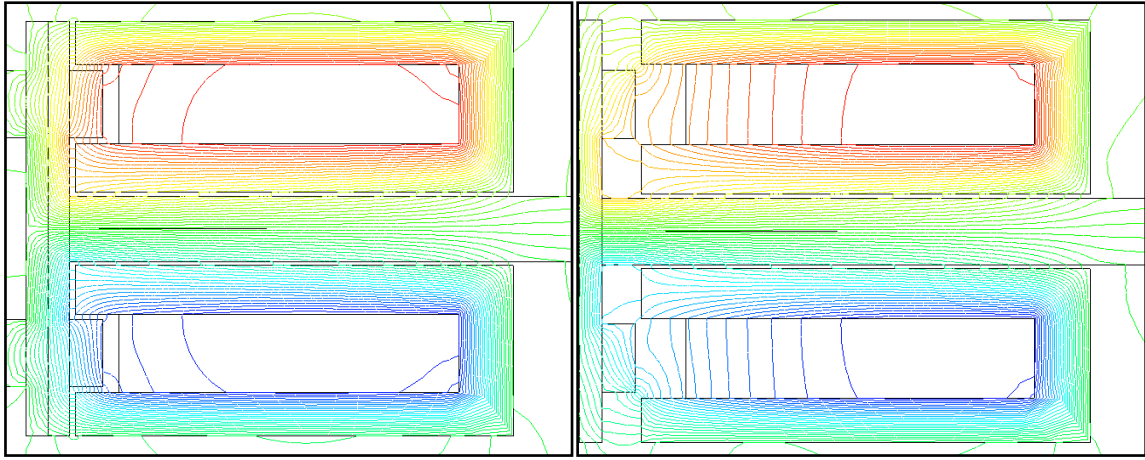
Şekil 18. Model 3A ve 3B Disk Tasarımları



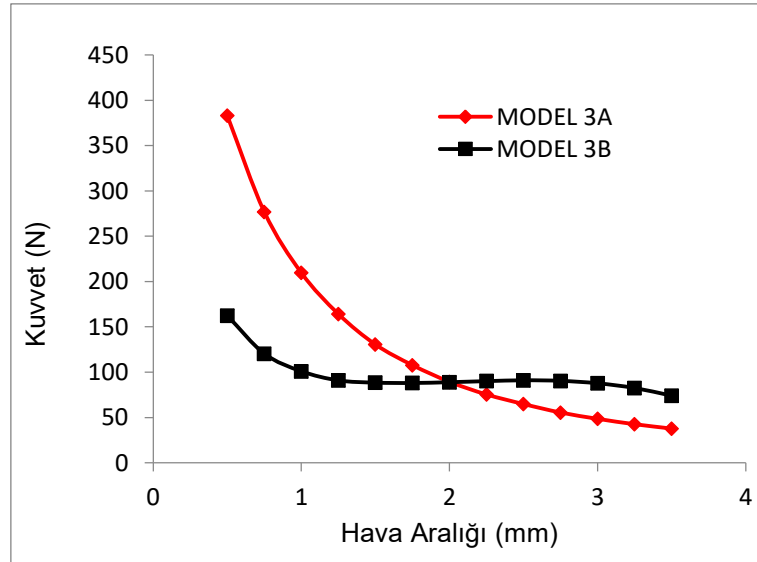
Şekil 19. Model 3B

Şekil 20'de 0,5 ve 3,5 mm hava aralığında diske etkiyen kuvvet çizgileri gösterilmiştir. Şekildeki akı yoğunluğundan da anlaşılacağı gibi bu tasarımda 3,5 mm'de diske etkiyen

kuvvet artırılmış fakat hava aralığı azaldıkça kuvvet çizgilerinin disk üzerindeki çıkıntıdan devreyi tamamlamasından dolayı Model 3A'ya göre kuvvet azalmıştır. Şekil 21'de ise Model 3A ile Model 3B'nin Flux programında analizi sonucu elde edilen kuvvet/hava aralığı grafiği gösterilmiştir. 3A modelinde 3,5 mm hava aralığı mesafesinden diske etki eden kuvvet yaklaşık olarak 37 N iken 3B modelinde aynı hava aralığında bu değer 74 N olmuştur. Buna rağmen 3B modelinde 2 mm hava aralığından sonra kuvvet değerleri 3A modeline göre daha düşük elde edilmiştir. Ancak ESM mekanizmasında kritik kuvvet değeri maksimum hava aralığında (3,5 mm) olduğu için daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere ESM için 3B Modelinin kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 20. 0,5 ve 3,5 mm hava aralığında diske etkiyen kuvvet çizgileri



Şekil 21. Model 3A ve 3B Hava Aralığı-Kuvvet Grafiği

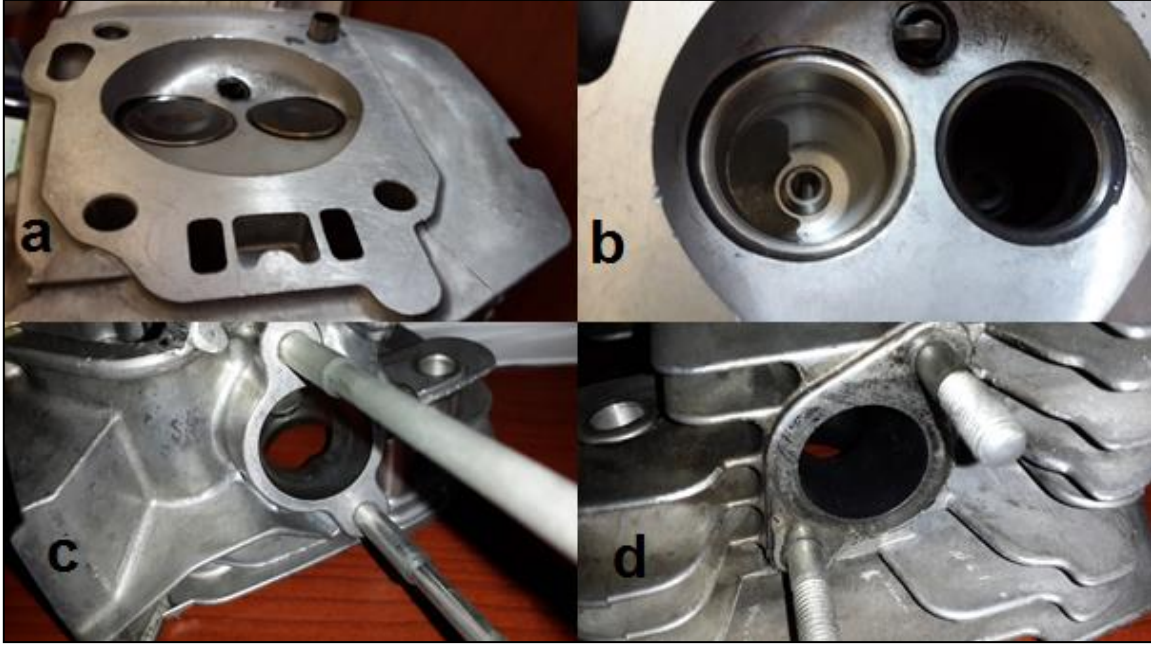
Tüm bu değerlendirmelerden sonra ESM Şekil 22'deki gibi imal edilmiş ve silindir kapağına montajı yapılmıştır.



Şekil 22. ESM'nin silindir kapağına montajı

5.3 CFD analizleri için bilgisayar modelinin hazırlanması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile 3 boyutlu akış analizi yapılacak olan motorun modelinin oluşturulması için silindir, emme ve egzoz manifoldu iç geometrileri, supap hareket profilleri gibi hassas ve detaylı bilgi gerektiren parametrelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Modelleme çalışmasında kullanılacak bu parametreler deneysel olarak kurulumu yapılan motor düzeneğinden elde edilmiştir. Deneysel çalışmada Honda GX-390 serisi jeneratör tipi buji ateşlemeli motor kullanılmıştır. Deneysel motorun üst kapağı Şekil 23'de görülmektedir. Şekildeki sol üst resimde emme ve egzoz supaplarının oturduğu silindir kapağı görülürken, sağ üst resimde ise supap kanallarının resimleri verilmiştir. Sağ ve sol alttaki resimlerde ise sırasıyla egzoz ve emme manifoldu girişleri görülmektedir. Ansys-Forte ticari yazılımı kullanılarak yapılan olan HAD analizlerinde portlar ve silindir içi hacim arasındaki hava akışı simule edilmiştir. HAD analizleri için motorun üst bloğundaki emme manifoldu, egzoz manifoldu ve supapların da dahil olduğu silindir iç hacminin modelleneceği bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeli oluşturulması gerekmektedir.



Şekil 23. Motor üst bloğunun fotoğrafları

5.3.1 Motor silindir hacmi ve manifoldların 3 boyutlu CAD modelinin oluşturulması

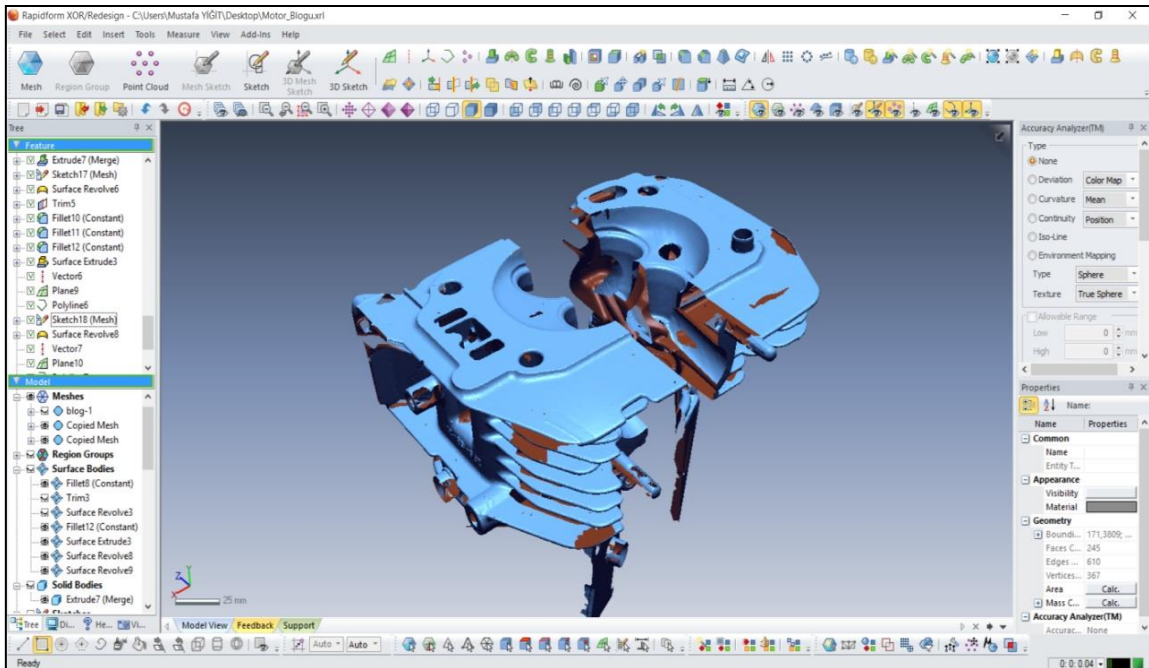
Deney çalışmasında kullanılacak olan Honda GX-390 serisi motorun 3 boyutlu modelini oluşturabilmek için gereken detaylı teknik resimlerine ulaşamamıştır. Bu sebeple atıl durumdaki silindir üst kapağı ve piston kullanılarak HAD analizleri için gerekli olan 3 boyutlu modellerin hazırlanması planlanmıştır. Fakat Şekil 23'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. Şekil 24'de görüldüğü üzere lazer tarama için Nikon K610 lazer tarama cihazı kullanılmıştır.



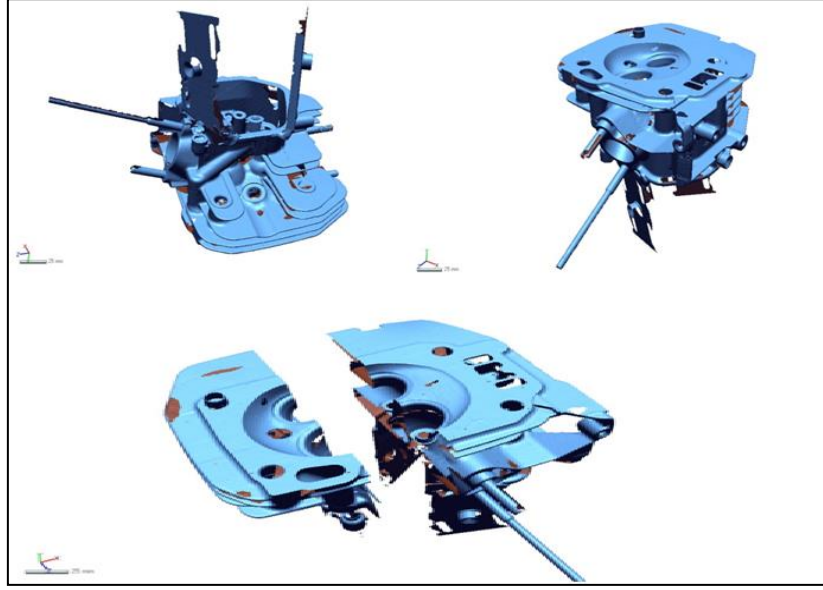
Şekil 24. Nikon K610 lazer tarama cihazı görüntüsü

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

Alınan bu veriler Şekil 25'de ara yüzü görülen Inus Firmasının Rapidform XOR yazılımı yardımı ile düzenlenmiş. Bütünleşik tek bir parçadan (motor üst geometrisi) alınan nokta bulutu yazılıma aktarılmış ve birkaç özel işlem kullanılarak STL formatındaki CAD modeli oluşturulmuştur. Şekil 26'da STL formatından katı modele dönüştürülmüş motor üst bloğunun görülmektedir.

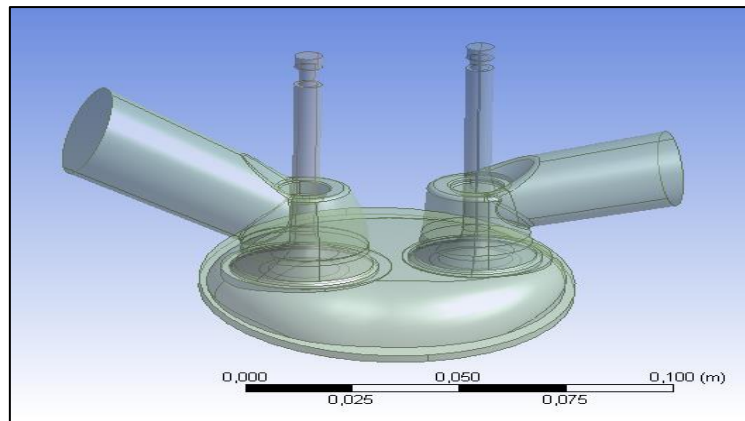


Şekil 25. Inus Technology Rapidform-XOR yazılımı arayüzü



Şekil 26. Tarama sonucu motor üst bloğunun CAD modeli

CAD modellemede Rapidform XOR modülü yardımı ile ana yüzeyler, federler ve radiuslar gruplanarak katı ve yüzey modellemeye başlanmış ve böylece motor üst bloğunun genel geometrik özelliklerine sadık kalınarak analize uygun bir tasarım oluşturulmuştur. Yapılacak CFD analizlerinde manifold ve silindir içi hava akışı modellenecektir bu sebeple sadece hava hareketlerinin gerçekleştiği bölgelerin CAD modelinin elde edilmesi gerekmektedir. CFD 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 27’de görülmektedir. İleriki başlıklarda detaylarının verileceği Ansys 16.0 İçten Yanmalı (İY) Motor yazılımındaki özel bir algoritmanın otomatik olarak yapacağı bir işlem için 3 boyutlu modelde emme ve egzoz valfleri silinmeden bırakılmıştır.



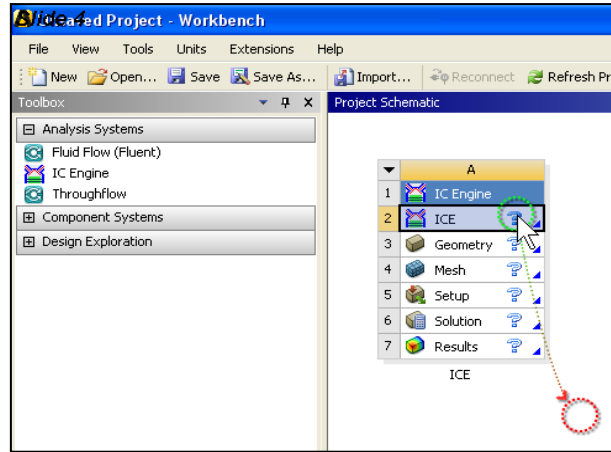
Şekil 27. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İçin Gerekli Model

5.3.2 HAD analizi için gerekli düzenlemelerin yapılması

Ansyes 17.2 Forte yazılımı yardımı ile HAD analizi yapılacak olan motor geometrisi üzerinde dinamik ağ yapısının sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Ansyes yazılımının 17. versiyonu ile bünyesine eklediği Ansyes Forte 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 Forte yazılımına aktarılır. Çözümün ardından sonuçlar Forte yazılımından alınabileceği gibi özellikle görsel sonuçlar için Results yazılımı da kullanılabilir.

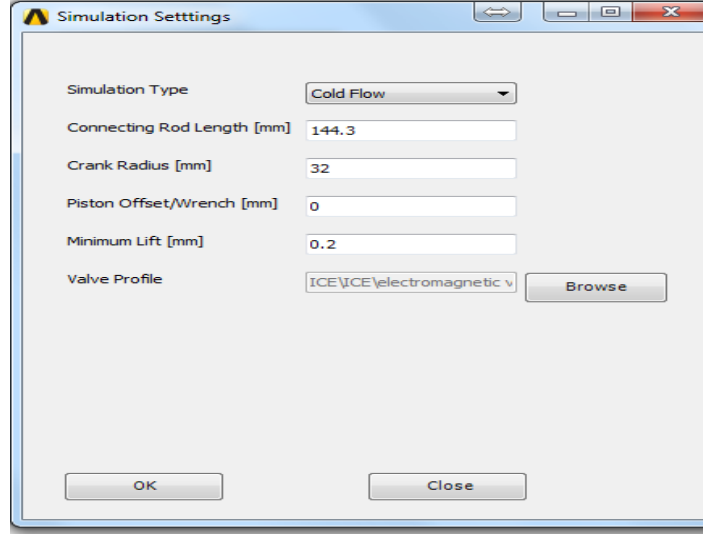
5.3.3 Motor parametrelerinin belirlenmesi

İY motor eklentisinde her adımda yapılması gereken işlemler Şekil 28'deki Ansyes Workbench ara yüzünde görülmektedir.



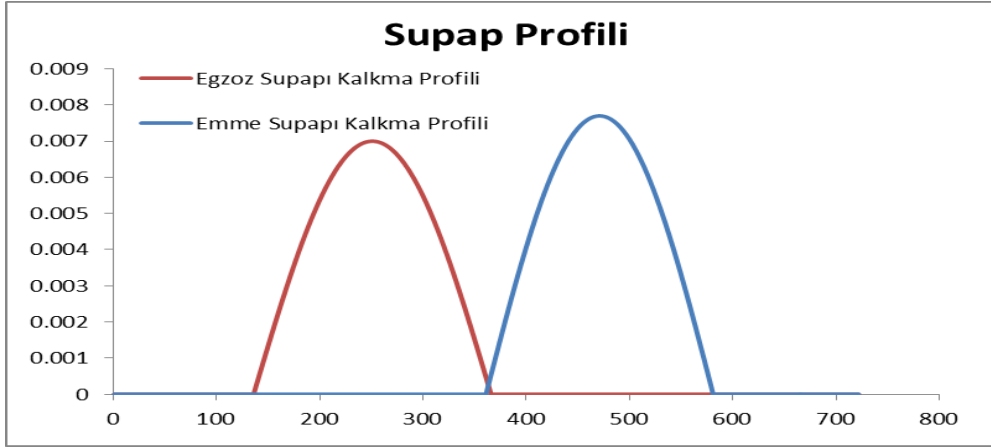
Şekil 28. ANSYS Workbench İY Motor arayüzü

Şekil 29'da 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 29. Test motorunun ilgili parametrelerinin girildiği kısım

Supap hareketleri için normal kam mili kullanılması durumunda emme ve egzoz supapları Şekil 30'da verildiği gibi sinüzoidal bir eğri şeklinde açılıp kapanma hareketi yapmaktadır. Bu eğri silindir içine emilen ve dışarı atılan hava miktarı ve silindir içerisindeki türbülans hareketlerini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden yapılacak CFD analizlerinde kullanılacak supap hareket profili deneysel çalışmadan elde edilecek verilerle oluşturulmuştur.

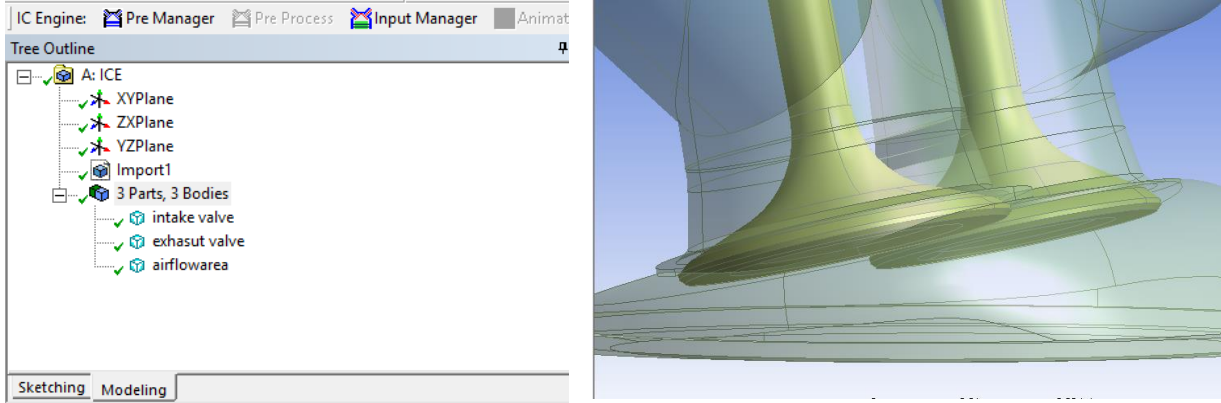


Şekil 30. Klasik Kam Mili Profiline Bağlı Supap Kalkma Yüksekliği

Bu proje kapsamında ilk aşamada klasik supap için profil oluşturulmuş ve ardından kam mili iptal edilerek yerine elektro-manyetik supap mekanizması yerleştirileceği için kam profili yerine açılıp kapanma zamanları ve supapların kalkma profilleri belirlenmiştir. Bu profiller ise deney esnasında supapların tepkime süresine göre belirlenerek yeni bir supap kalkma profili oluşturulmuştur.

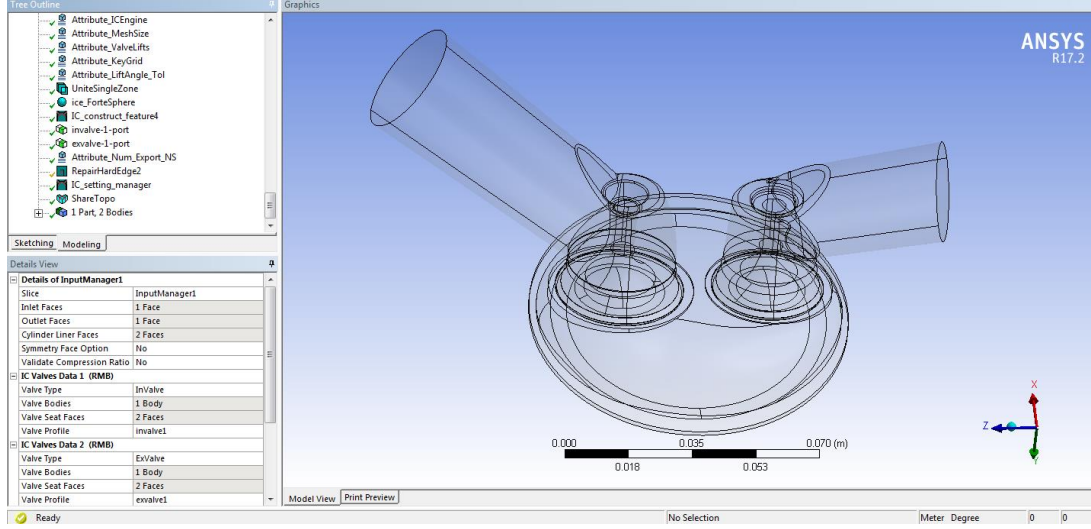
5.3.4 Hacimlere ayırma ve isimlendirmelerin yapılması

HAD analizi için hazırlanan 3 boyutlu model Ansys yazılımına aktarılmıştır. Burada önemli olan yazılıma CAD modelinin yüzey model olarak değil, tamamen bir katı model olarak aktarılmasıdır. Ayrıca modelin 3 parçadan ve 3 ana gövdeden oluşması gerekmektedir. Şekil 31’de görüldüğü gibi katı model oluşturulurken montaj esnasında ilişkilendirme yapılarak bu işlem gerçekleştirilmiştir.



Şekil 31. Modelin import edilmesi 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, bölgelere ayırarak ve her bölgeye ayrı ayrı isim verilerek 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 gerçekleştirildikten sonra Şekil 32’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 32. Parçalara ayırma işlemi gerçekleştikten sonraki geometrinin görünümü

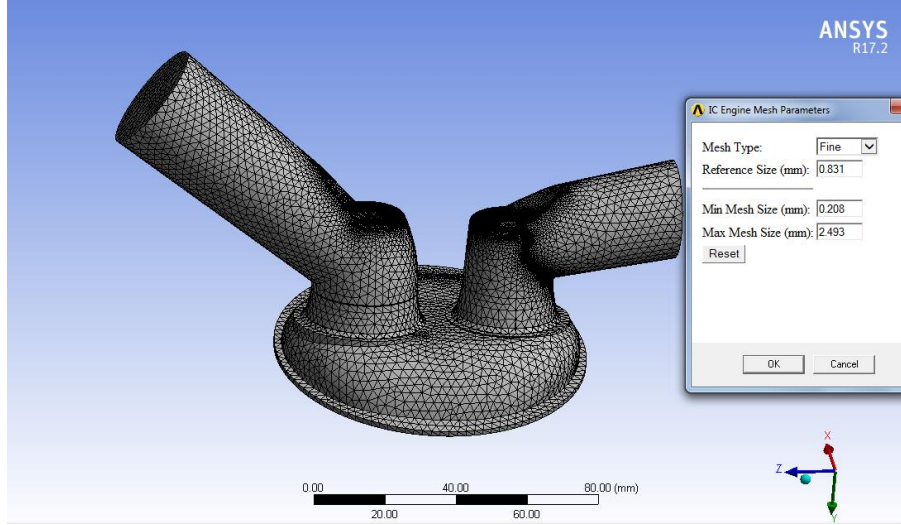
Hareketli ağı yapısı işleminin düzgün bir şekilde gerçekleşebilmesi için özellikle silindir içi hacim ve supapların oturma yüzeyleri çok daha fazla bölgelere ayrılarak oluşturulmaktadır. Bu analizde 3 farklı hareketli ağı yapısı olduğu için ağı yapısının oluşturulması işleminin doğru bir şekilde gerçekleşmesi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

5.3.5 Ağı yapısının oluşturulması

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

Şekil 33'de ağı yapısının hassas bir şekilde oluşturulması için gerekli parametreler İY ağı parametreleri kısmından girilerek ağı yapısının oluşturulması sağlanmıştır. HAD analizlerinde en fazla dikkat edilmesi gereken şeylerden biri de ağı yapısı modelidir. Ağı yapısı ne kadar düzenli ve çok sayıda olursa yapılan analiz de o kadar sağlıklı ve güvenilir olmaktadır. Çözüm süresi çok önemli bir faktördür ve bu yüzden oluşturulacak ağı yapısının, analizin olabildiğince yakınsamasını sağlayacak ölçüde yeterli ve çözüm süresini de en aza indireyecek kadar az olması sağlanmalıdır.

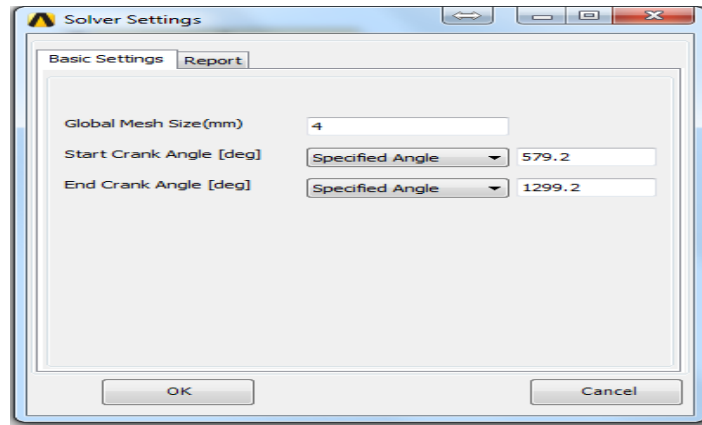
Yapılan analiz zamana bağlı çözümlerden oluşmaktadır. Zamana bağlı ve dinamik ağı yapısı kullanılarak yapılan analizler toplam çözüm süresini çok büyük boyutlara taşımaktadır.



Şekil 33. Otomatik ağ yapısı parametrelerinin ayarlanması

5.3.6 Ağ yapısı ayarları

Pistonun üst ölü noktadaki durumundaki modelin ağ yapısı oluşturulduğunda, hata vermesi nedeniyle mesh 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. Simülasyon sonuçları incelenirken bu zamanlar dikkate alınmıştır. Şekil 34'de 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 34. Genel ağ yapısı boyutu ve Analiz Başlangıç-Bitiş Zamanlaması

Forte yazılımının 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 bağlı olarak hacimdeki ağ sayıları

artıp azalmaktadır. Forte yazılımı ise adaptif ağ yapısı yenileme metodu sayesinde her bir krank açısında simülasyonda önceden tanımlanan parametrelere göre (akış, hız, türbülans yoğunluğu, sıcaklık, basınç) lokal olarak ağ sayısını belirler ve çözümü bu şekilde gerçekleştirir. Bu sayede diğer yazılımlara göre az sayıda mesh kullanması nedeniyle çözüm hızı oldukça yüksektir. Diğer yazılımlarla günlerce süren analizler adaptif ağ yapısı yenileme metodu ile saatler mertebesine indirebilmektedir.

5.3.7 Supap profili oluşturulması

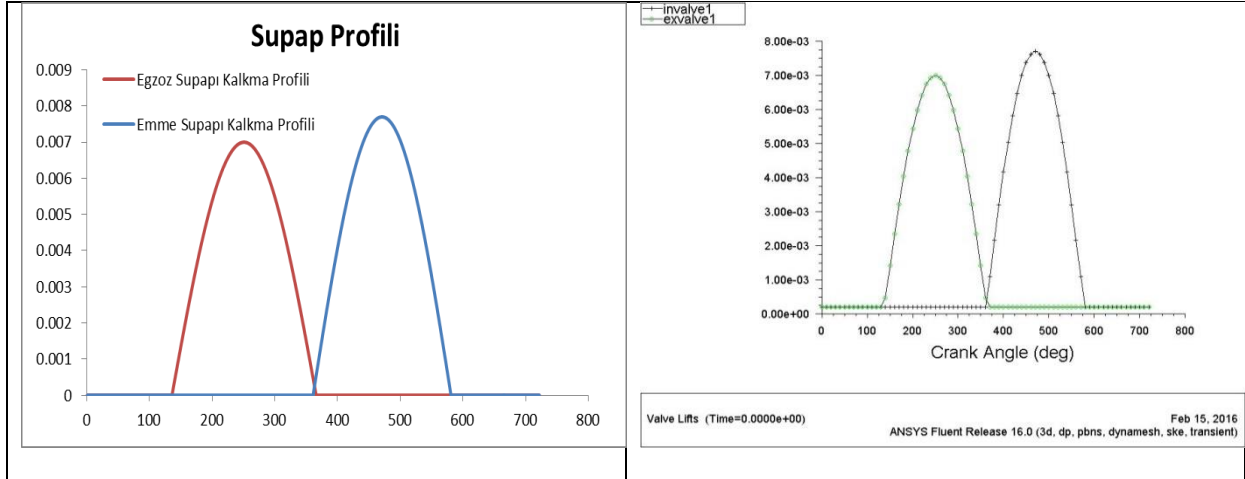
Projenin zaman çizelgesi içerisinde 1. Ara rapor zamanına kadar modelin hazırlanması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 2. Ara rapor zamanında standart kam profili oluşturulması ve analizlerin standart kam ve zamanlama için analizler gerçekleştirilmiştir. Supapların açılma kapanma ve kalkma yükseklikleri tespit edilmiştir. Emme supabı üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) açılma avansı bulunmamakta yani piston tam üst noktada iken açılmaya başlamakta ve alt ölü noktadan 40 krank mili açısı(KMA) sonra (AÖNS) kapanmaktadır. Egzoz supabı ise alt ölü noktadan 45 KMA önce açılmakta (AÖNÖ) ve üst ölü noktadan 5 KMA önce kapanmaktadır. Standart bir kam profili Matlab yazılımı ile oluşturulmuştur. Motorun standart supap zamanlaması ve supap kalkma yüksekliği değerleri Tablo 8'de aşağıda verilmiştir.

Tablo 8. Motorun standart supap zamanlaması ve maksimum supap kalkma yüksekliği

	AÇILMA (°)		KAPANMA (°)		SUPAP KALKMA (mm)
	ÜÖNS	0	AÖNS	40	
EMME	ÜÖNS	0	AÖNS	40	7,8
EGZOZ	AÖNÖ	45	ÜÖNÖ	5	7

Bu zamanlamaya göre emme ve egzoz kalkma profilleri için denklem çıkartılarak eğriler oluşturulmuş ve ardından Ansys Forte modülünün supap zamanlamasına uyarlanarak grafik haline dönüştürülmüştür ve Şekil 35' de gösterilmiştir. Bu modülde 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.

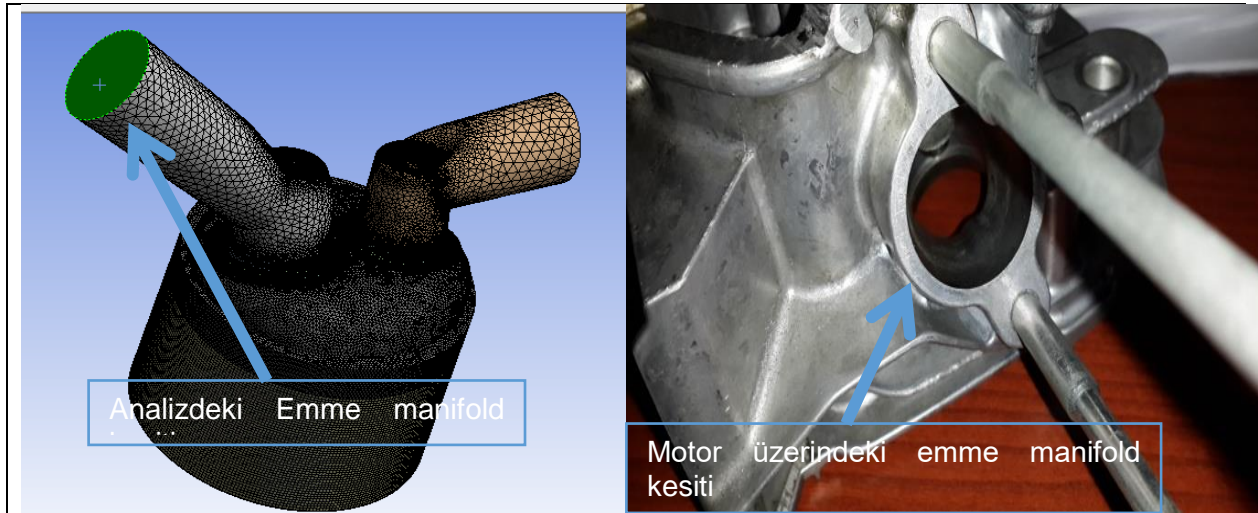
Profilin uygun olmasının ardından Ansys IC Engine modülüne bu profili yükleyip emme ve egzoz supaplarının dinamik mesh olayının halledilebilmesi için. proof uzantılı bir dosya gerekmektedir. Bu dosya yukarıdaki profili oluşturulan denklem sayesinde her bir krank açısı için kalkma yüksekliğine göre oluşturulmuştur.



Şekil 35. Motorun standart zamanlaması için Ansys IC Engine modülüne göre supap profili

5.3.8 Sınır şartlarının belirlenmesi

2. Ara rapor kısmına kadar motorun standart kamları ile yapılan hava ve basınç ölçümleri doğrultusunda analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel Kısımda 800-3000 devir arası tarama yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında 1600-3000 devir aralığı için 200 devir aralıklara analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler 1 tam döngü olan 720 krank açısı için yapılmıştır. 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 de incelenmiştir. Analiz çalışmasında kütleli hava debisi hesaplamaları yapılırken geometrinin emme manifoldu giriş kesiti seçilmiştir. Şekil 36' de Deneysel ve analiz ortamında emme manifoldu kesitleri gösterilmiştir.

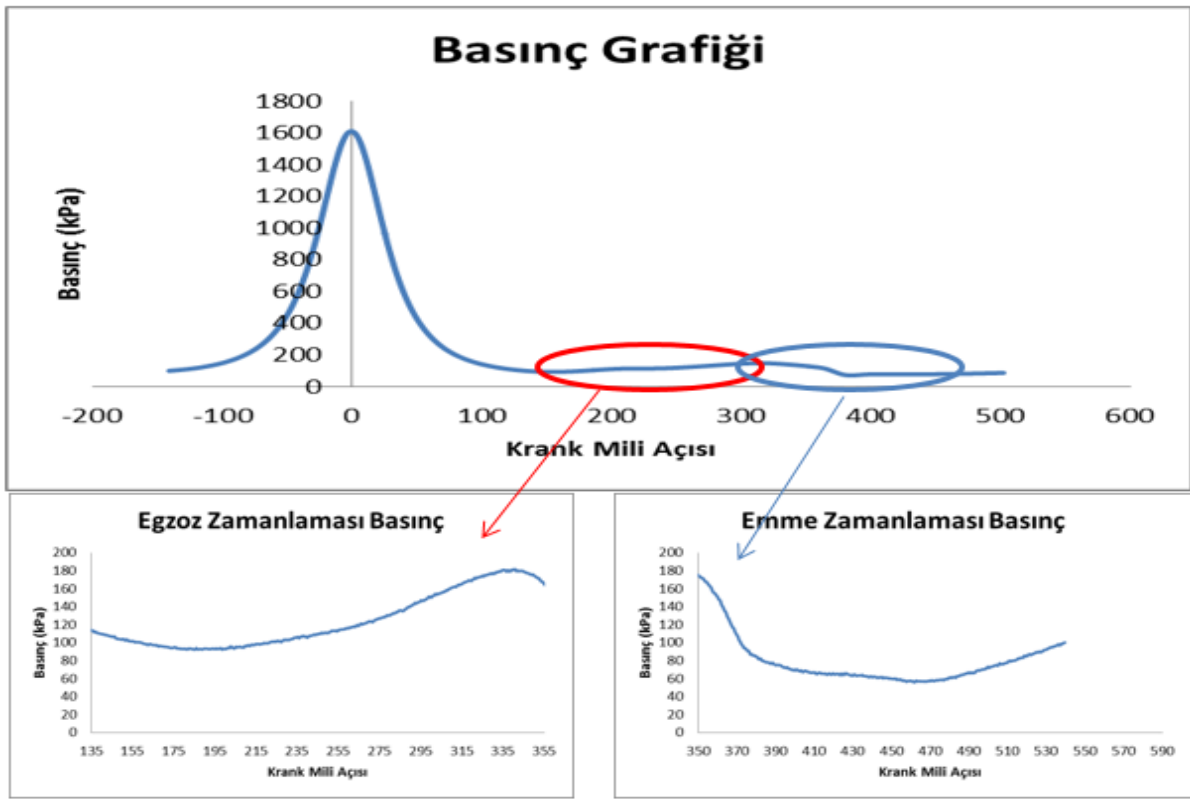


Şekil 36. Deneysel ve analiz ortamında emme manifoldu kesitleri

Emme manifoldu hava giriş kesitinden geçen havanın hız vektörlerine, kesitin ölçülerine ve havanın yoğunluğuna göre analiz içerisinde tanımlı olan her zaman adımında ölçümleri

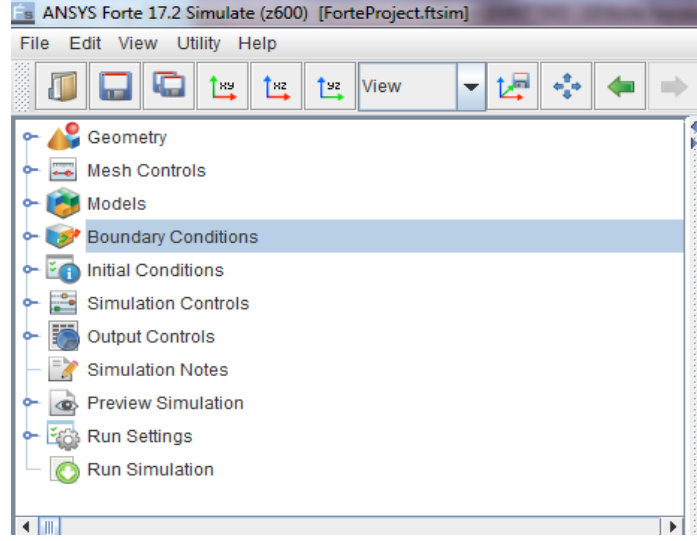
alınarak kayıt edilmiştir. Alınan bu ölçümlerin ortalaması ise bize havanın kütleli akış debisini vermektedir.

Analizlerin doğru bir şekilde sonuç vermesi için emme ve egzoz manifoldunda sıcaklık ve basınç değerlerinin ölçümü yapılması gerekmektedir. Şekil 37’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.



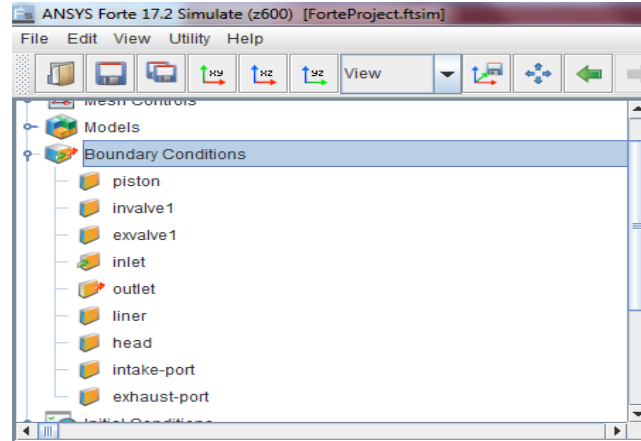
Şekil 37. Emme ve egzoz periyodu basınç grafikleri

Krank açısına bağlı basınç verilerinden, emme ve egzoz zamanındaki silindir içi en düşük basınç değeri seçilerek analizde gerekli olan giriş (emme manifoldu) ve çıkış (egzoz manifoldu) basınç olarak girilecek değerler seçilmiştir. Ansys Forte yazılımının arayüz görseli Şekil 38’de görülmektedir. Seçilen bu değerler Forte yazılımının arayüzünde bulunan başlangıç koşulları kısmında girilmiştir.



Şekil 38. Ansys Forte Arayüzü

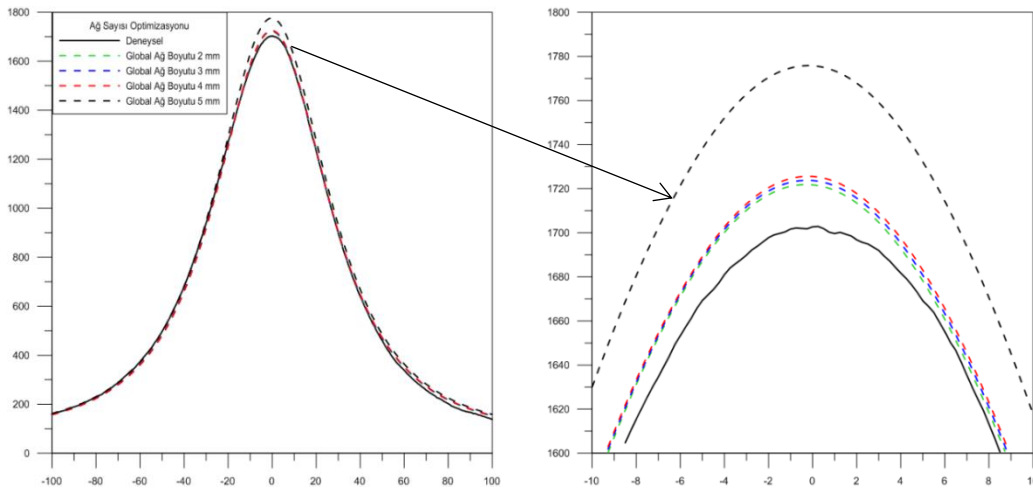
Ağ yapısı ve yüzey isimlendirmesi sonucu yüzey koşulları 9 farklı bölgeye ayrılmıştır. Bu 9 bölge için sıcaklık ve basınç değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Şekil 39'da sınır koşulları yazılımın arayüz ekranında gösterilmiştir. Emme ve egzoz manifoldu sıcaklığı, piston yüzey sıcaklığı, silindir blok kısmı sıcaklığı ve silindir gömlek sıcaklığı değerleri girilmekte ve ayrıca emme ve egzoz hattındaki basınç değerleri de girilmektedir. Emme ve egzoz manifoldu basınç ve sıcaklık değerleri deneysel verilerden alınmıştır. Yanma gerçekleştirilmediği için, piston yüzeyi, silindir gömleği ve silindir üst çatı kısmı sıcaklıklarının ölçülen yağ sıcaklığı değerine göre ortalaması alınmış ve 328 K olarak yazılıma girilmiştir.



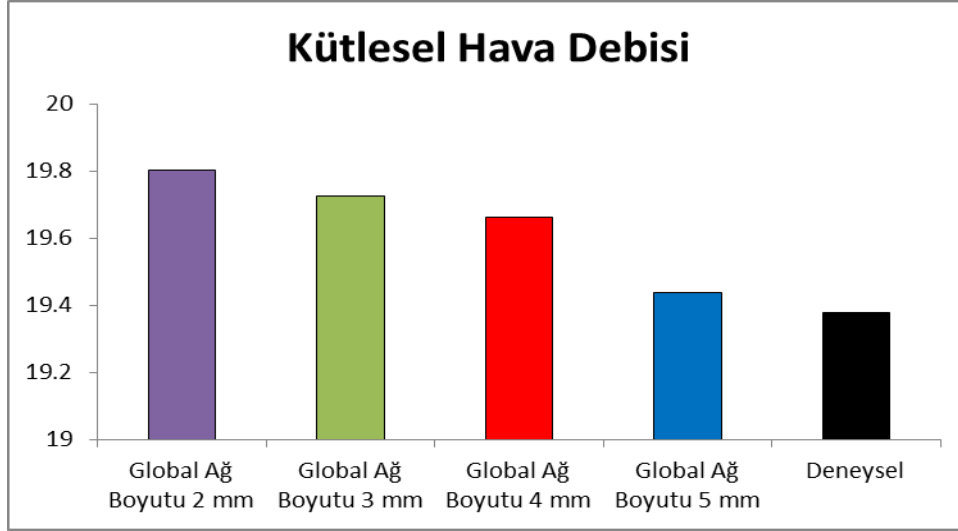
Şekil 39. Sınır koşulları

5.4 Ağ yapısı optimizasyonu

Ağ yapısı optimizasyonu genel olarak simülasyon çalışmalarında çok önemli bir yere sahiptir. Çözümün düşük sayıda ağ yapısı ile yapılması durumunda analiz sonuçlarının doğrudan etkilendiği bilinmektedir. Ağ yapısının çok fazla olması da analiz süresini arttırmakta ve ciddi bilgisayar kapasitesi (RAM) gerekmektedir. Bu nedenle, 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 belirlenmesi 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 yapısının anlık olarak 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 bu yazılımda otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. 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 ve 2 mm olması durumlarında silindir içi basınç ve kütleli hava debisi değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 40'da farklı global ağ boyutunun maksimum silindir içi basıncına etkileri 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 ise Şekil 41'de görülmektedir.



Şekil 40. Farklı global ağ boyutunun silindir içi basınca etkisi



Şekil 41. Farklı global ağ boyutunun kütleli hava debisine etkisi

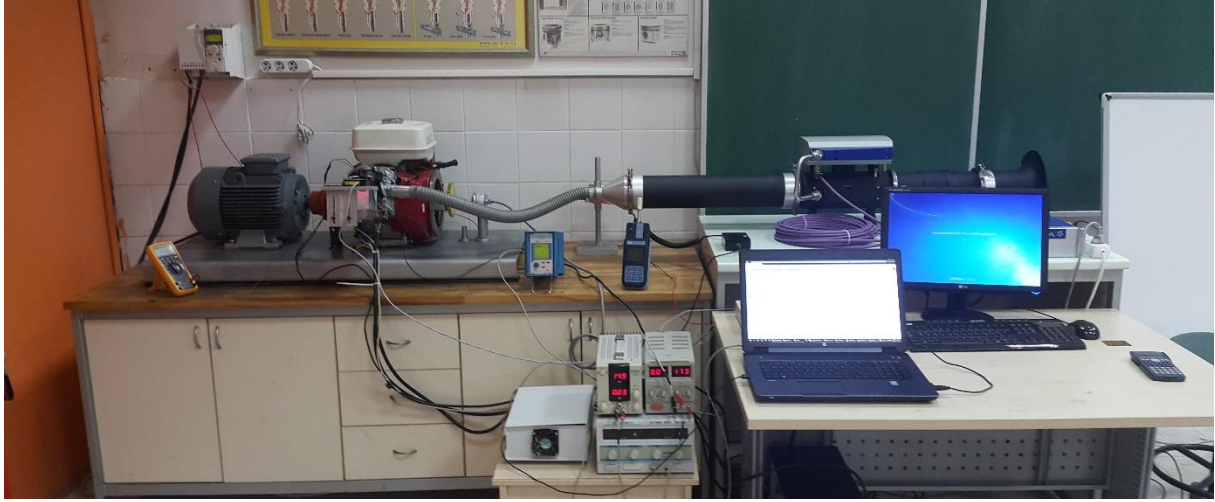
Grafikte görüldüğü üzere, 4 mm global ağ boyutundan itibaren sonuçların çok düşük miktarlarda değiştiği görülmektedir. Her iki grafik değerlendirildiğinde, global ağ boyutunun 4 mm olarak seçilmesinin uygun olduğu anlaşılmaktadır. Bu netice ile tüm analizlerde global ağ boyutu 4 mm olarak seçilmiştir. Sıcaklıklar ise emme ve egzoz manifoldlarına bağlanan termokupllar ile anlık ölçüm alınmıştır. Analizler için gerekli olan emme ve egzoz manifoldu sıcaklık ve basınç değerleri Tablo 9'da gösterilmiştir. Basınç dataları ise krank açısına bağlı basınç verilerinden emme ve egzoz yapılırken ki silindir içi en düşük basınç değeri seçilerek analizde gerekli olan giriş (emme manifoldu) ve çıkış (egzoz manifoldu) basınç olarak girilecek değerler seçilmiştir.

Tablo 9. Analizlerde gerekli emme (giriş) ve egzoz (çıkış) hava sıcaklığı ve basıncı

Devir/Dakika	Emme Sıcaklığı	Egzoz Sıcaklığı	Emme Basıncı (Pascal)	Egzoz Basıncı (Pascal)
800	20,6	27	80483	63856
1000	20,7	29	82368	73685
1200	20,5	31	84310	80605
1400	20,4	32	87128	106861
1600	20,4	34	87748	93510
1800	20,5	38	89070	109835
2000	20,5	42	89040	109283
2200	20,6	45	90065	109706
2400	20,6	49	92515	109480
2600	20,7	52	92598	109227
2800	21,0	56	91959	108717
3000	21,1	57	91999	106513

5.5 Klasik kam mekanizması ile yapılan motor testleri

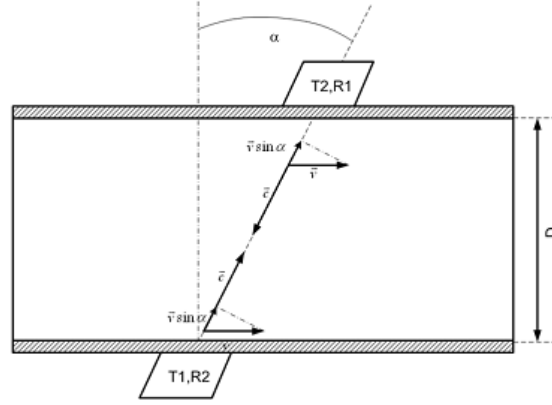
Bu aşamada üzerinde klasik kam mekanizması bulunan test motorumuzda 800 dev/dk ile 3000 dev/dk arasında 200 dev/dk aralıklarla emme havası sıcaklığı, egzoz çıkış sıcaklığı, silindir basıncı ve silindire alınan hava kütlesi değerleri Şekil 42’de gösterilen test düzeneği ile ölçülmüştür. Ayrıca test şartlarındaki hava değerleri (nem, sıcaklık, atmosfer basıncı) ölçülerek kaydedilmiştir. Elektrik motoru, motor sürücü yardımıyla çalıştırılarak benzinli motorun sabit devirlerde yanmasız çalışması sağlanmıştır. Motor istenilen devre ulaştıktan sonra, ultrasonik debimetreden hava tüketimi verileri alınmış ve kaydedilmiştir. Her bir devir için basınç sensörü, krank açısı sensörü ve DAQ kartı ile krank açısına bağlı olarak silindir basınçları da ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler CFD analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 42. Test düzeneği

5.6 Ultrasonik debimetre ile hava debisinin ölçülmesi

Ölçüm prensibi; ultrasonik geçiş süresi diferansiyel yöntemini esas almaktadır. Ultrasonik debimetrenin içinde birbirine karşılıklı monte edilmiş vericiler (T1, T2) ve alıcılar (R1, R2) vardır. Bu alıcılar karşılıklı olarak birbirlerine ultrasonik sinyaller (c) göndermektedir. Borudaki sıvının akış yönüne gönderilen sinyal ile akış yönüne karşı gönderilen sinyalin alıcılara ulaşma süresi farklılık gösterir. Akış yönüne (v) gönderilen sinyal (c) daha çabuk giderken (R1 alıcısına ulaşan sinyal) aksi istikamete gönderilen sinyalin alıcılara ulaşması (R2 alıcısına ulaşan sinyal) daha uzun süre alır. Aradaki bu zamansal fark matematiksel bir formül ile cihaz tarafından hesaplanır ve cihaz ile hava akış debisi ölçülmüş olur. Şekil 43’de ultrasonik debimetrenin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 43. Ultrasonik debimetrenin yapısı

T1 den R1 e hareket eden sinyal için geçen zaman;

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

T2 den R2 ye hareket eden sinyal için geçen zaman;

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

2 sinyal arasındaki zamansal fark;

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

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

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

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

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

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

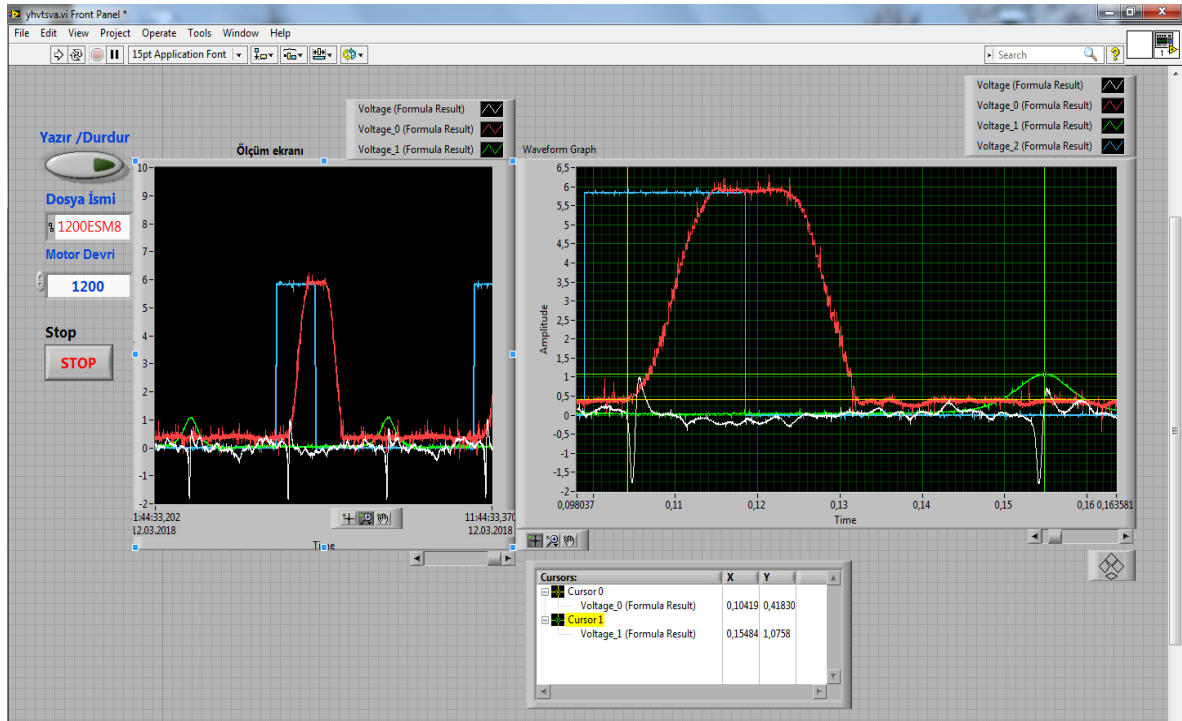
Bunlara ek olarak ultrasonik sinyal hızı şu şekilde belirlenir;

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

6. BULGULAR

6.1 Deneysel Verilerin Toplanması

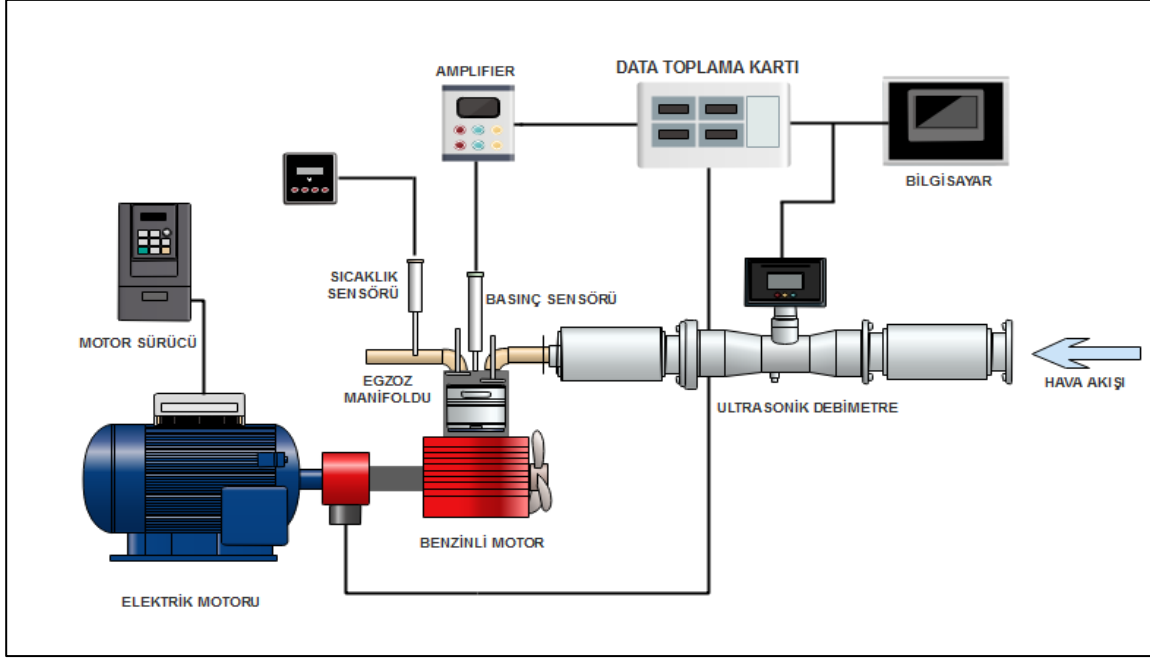
Deneysel düzeneğinde klasik ve elektromanyetik emme supabı profilleri, üst ölü nokta, silindir basıncı ve kontrol sinyali verileri National Instruments (SCB68) veri toplama kartı yardımıyla alınmıştır. Veri toplama işlemi LabVIEW programı ile kanal başına 30 kS/s'da yapılmıştır. Şekil 44'de programın arayüzü gösterilmektedir. Supap profili RIFTEK (603) lazer mesafe sensörü ile belirlenmiştir. Ayrıca ortam havası değerleri de Delta Ohm (HD21AB17) cihazıyla kaydedilmiştir.



Şekil 44. Data Toplama programı arayüzü

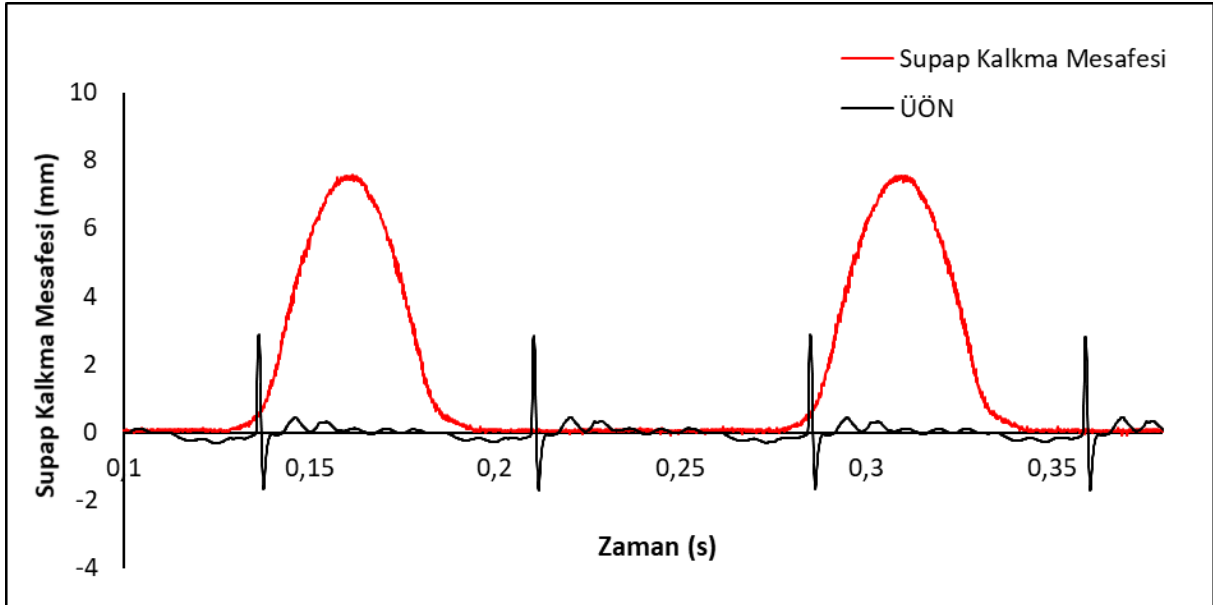
6.2 Klasik Sistem Deneysel Sonuçları

Klasik sistem için belirli devirlerde silindir basıncı, emme supabı profili, emme ve egzoz havası sıcaklık değerleri, hava tüketimi ve ortam havası verileri alınmıştır. Şekil 45'de deneysel düzeneğinin şeması sunulmuştur.

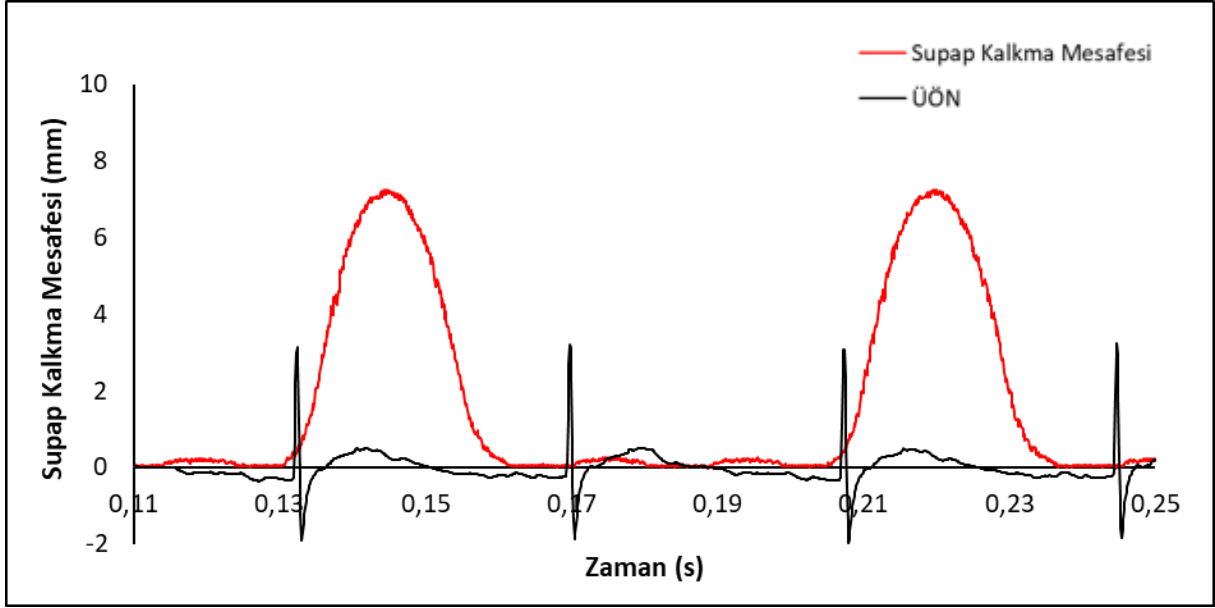


Şekil 45. Deney düzeneğinin şeması

Klasik supap mekanizması ile 800 ve 1600 dev/dk'daki emme supabı profili ve üst ölü nokta sinyali zamana bağlı olarak Şekil 46 ve 47'de gösterilmiştir.



Şekil 46. 800 dev/dk'da klasik emme supabı profili



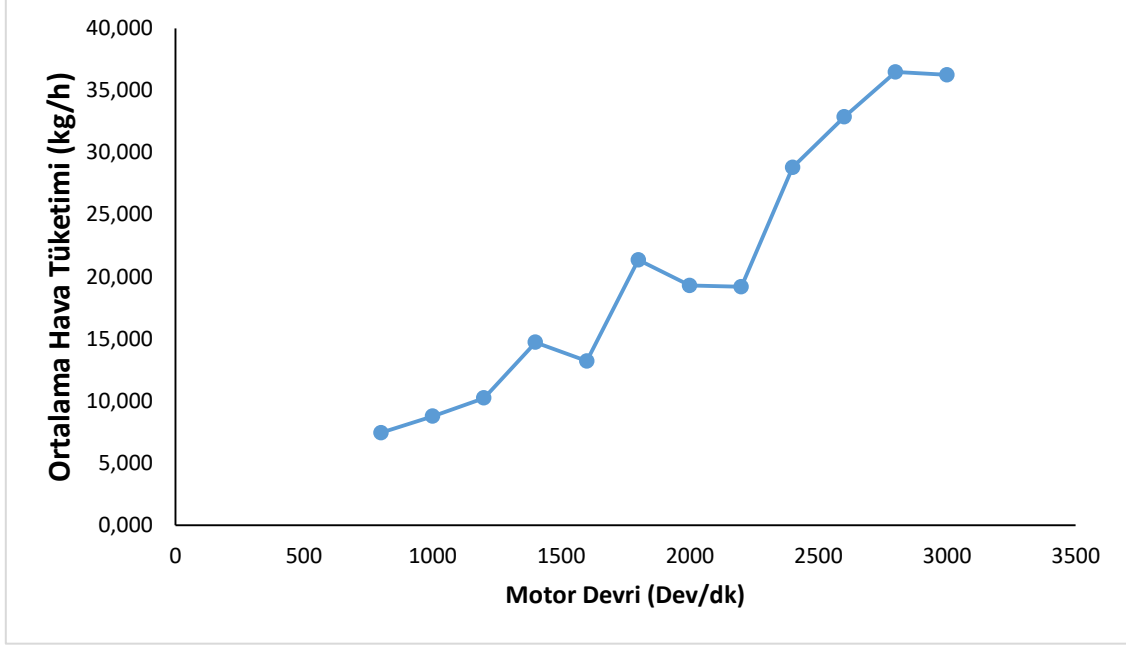
Şekil 47. 1600dev/dk'da klasik emme supabı profili

6.2.1 Ultrasonik debimetreden elde edilen test sonuçları

Yapılan motor testlerinde çeşitli devirlerde debimetreden ölçülen ortalama hava kütlesi değerleri Tablo 10'da gösterilmiştir. Hava debisi ölçümlerinde testler üç defa tekrarlanmıştır. Bu testler sonucunda elde edilen verilerin ortalaması, silindir içine alınan ortalama hava miktarını göstermektedir. Ayrıca Şekil 48'de motor devrine göre hava tüketim grafiği gösterilmiştir.

Tablo 10. Silindire alınan ortalama hava kütlesi

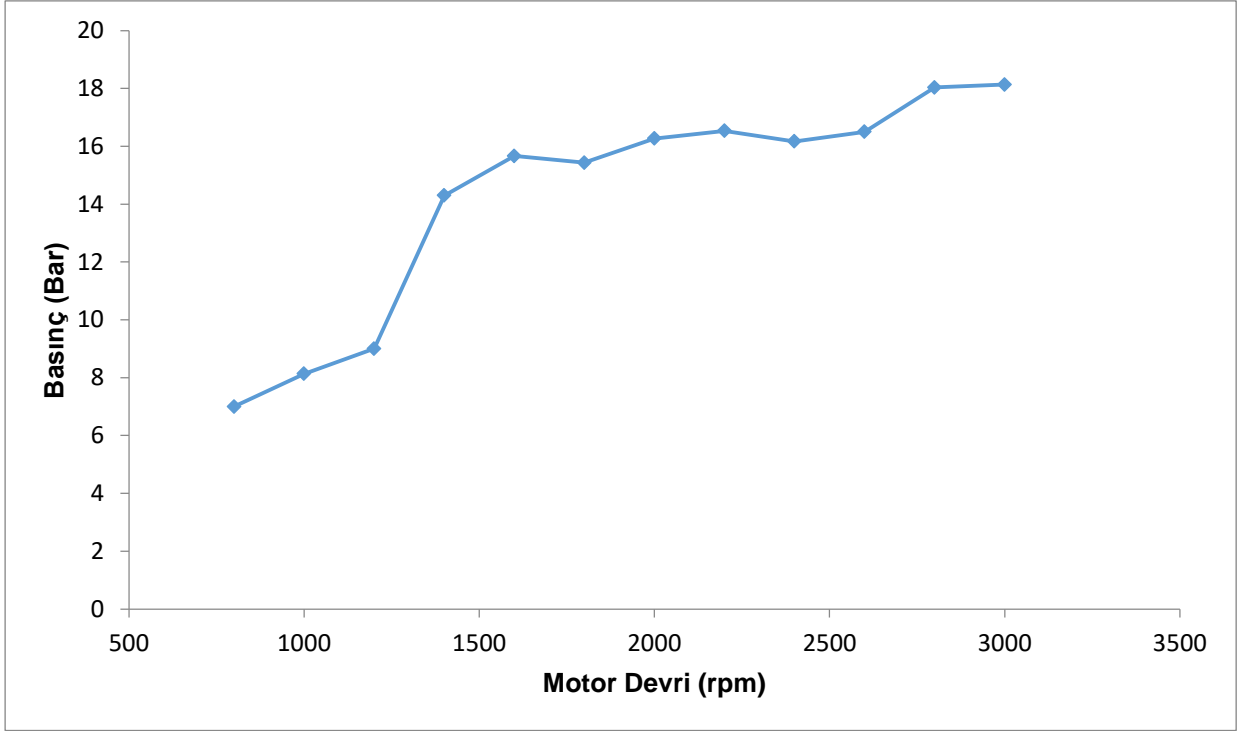
Motor Devri (dev/dk)	Test süresi [sn]	Ortalama Hava Kütlesi [kg/h]
800	180	7,446
1000	180	8,765
1200	180	10,234
1400	180	14,719
1600	180	13,218
1800	180	21,362
2000	180	19,294
2200	180	19,187
2400	180	28,797
2600	180	32,855
2800	180	36,478
3000	180	36,249



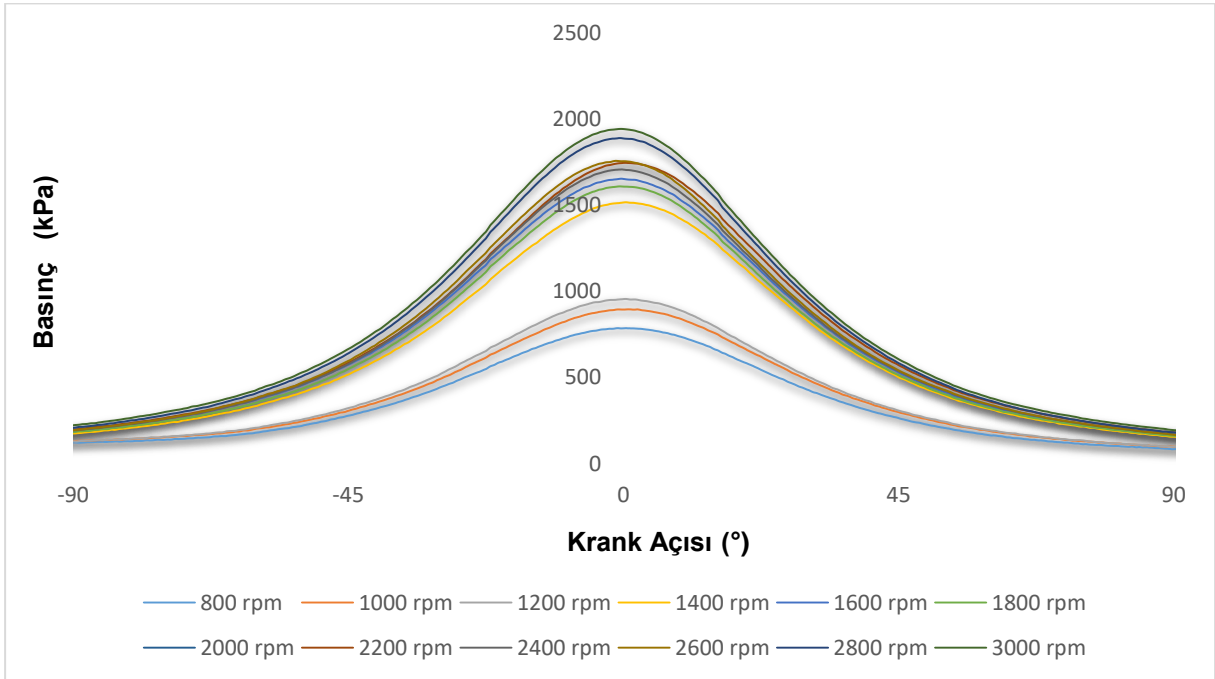
Şekil 48. Motor devrine göre hava tüketimi

6.2.2 Silindir basıncı ölçümleri

Testlerin bu aşamasında ise krank açısına bağlı olarak silindir gaz basınç verileri alınmış ve testler sonucunda her bir devre ait silindir gaz basınçlarının krank açısına bağlı değişimleri Şekil 49 ve 50’de gösterilmiştir. Silindir gaz basıncı verileri için 50 çevrimin ortalaması kullanılmıştır. Maksimum silindir gaz basıncının genellikle motor devrinin artmasıyla arttığı görülmüştür. Maksimum silindir gaz basıncının 2800 dev/dk ve 3000 dev/dk şartlarında elde edildiği, 1600 dev/dk- 2600 dev/dk aralığında maksimum basınçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Motorun 800 dev/dk- 1200 dev/dk aralığında silindir gaz basınçlarında motor devriyle bir artma oluşurken 1200 dev/dk’den 1400 dev/dk’ya çıkarken kayda değer bir şekilde maksimum silindir gaz basıncının arttığı bu durumun test motorunda bulunan kam mekanizmasından (dekompresyon) dolayı kaynaklandığı tespit edilmiştir. Şekil 50’de motor devrinin artışıyla silindir gaz basıncının krank açısına bağlı değişimine bakıldığında silindir gaz basıncının, sıkıştırma ve genişleme sürecinde daha geniş bir profile sahip olduğu belirlenmiştir. Sıkıştırma oranının sabit olmasına ve kam profillerinin değişken olmamasına rağmen emilen hava miktarındaki artış silindir gaz basıncının hem sıkıştırma hem de genişleme sürecindeki profilini etkileyerek silindir gaz basıncının motor devriyle artmasına imkan tanıdığı görülmektedir.



Şekil 49. Motor devrine göre maksimum silindir basınçları



Şekil 50. Krank açısına bağlı olarak silindir basınçları

6.2.3 Emme ve egzoz manifoldu sıcaklıkları

Yapılan testler sonucunda emme manifoldu egzoz çıkış sıcaklıkları Tablo 11'da gösterilmiştir. Egzoz çıkış sıcaklığı 1400 dev/dk'ya kadar artmakta ve bu devirden sonra dekompresyon

nedeniyle sıcaklık 1400 dev/dk'da ani bir düşüş göstermektedir. Ancak bu devirden sonra egzoz gazı sıcaklığı tekrar artmış ve devir yükseldikçe sıcaklık değerleri de yükselmiştir.

Tablo 11. Emme manifoldu ve egzoz çıkış sıcaklıkları

Motor Devri (dev/dk)	Emme Manifoldu Sıcaklığı (°C)	Egzoz Sıcaklığı (°C)
800	23,1	38,9
1000	23,2	39,9
1200	23,2	41,2
1400	23,2	29,8
1600	23,4	31,6
1800	23,4	35,8
2000	23,4	38,8
2200	23,5	42,9
2400	23,5	49,9
2600	23,5	51,2
2800	23,6	53,1
3000	23,9	59,5

6.2.4 Volumetrik verimin hesaplanması

Hava emme manifoldundan geçerken, yüzeyde meydana gelen sürtünmeler akışı sınırlandırarak basınç düşümüne sebep olur. Aynı zamanda, hava silindir içerisine akarken, havanın katmanları arasında viskoz sürtünme kayıpları meydana gelmekte ve hava filtresi, emme supap yüzeylerinden etkilenmektedir. Bu durum, emme zamanında silindire alınan hava miktarında azalmalara yol açmaktadır. Yapılan testlerde motorun hava filtresi ve karbüratörü çıkarılarak debimetre direkt olarak emme manifolduna bağlanmıştır ve motorun hava tüketimi ölçülmüştür.

Volumetrik verim; gerçekte silindire giren havanın, teorikte silindire girmesi gereken havaya oranı olarak tanımlanmaktadır.

Volumetrik verim (η_v);

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

- $\rho_{a,i}$: Giren havanın yoğunluğu,
- \dot{m}_a : Giren havanın kütleli debisi,

Alternatif olarak volumetrik verim şu eşitlikle de belirlenebilir;

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,i} \cdot V_d}$$

➤ m_a : Silindir başına giren havanın kütlesi

Bu durumda volumetrik verimin hesaplanabilmesi için gerekli olan verilerden giren havanın kütleli debisi bilinmektedir. Test şartlarında havanın yoğunluğunun hesaplanabilmesi için ortamın nem değeri, sıcaklık ve atmosfer basıncı değerleri Delta Ohm marka hava kalitesi ölçüm cihazıyla ölçülmüştür. Ayrıca bu değerlere ek olarak ortam havasında bulunan CO₂ emisyonu miktarları da Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Test Şartlarındaki Ortam Hava Değerleri

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

Bu verilerden yola çıkılarak ortam şartlarında havanın yoğunluğu 1,139 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda;

$$\eta_v = \frac{2 \cdot m_a}{\rho_{a,i} \cdot V_d \cdot N}$$

Formülünde değerler yerine yazıldığında;

$$\eta_v = \frac{2.7,446}{1,139.389 \cdot 10^{-6} \cdot 800.60}$$

Eşitliğinden 800 dev/dk’de volumetrik verim %70 olarak bulunmuştur. Diğer test devirlerinde elde edilen volumetrik verim değerleri Tablo 13’ de verilmiştir. Volumetrik verim genellikle motor devrinin artışıyla arttığı ancak bazı devirlerde devrin artışına rağmen düştüğü

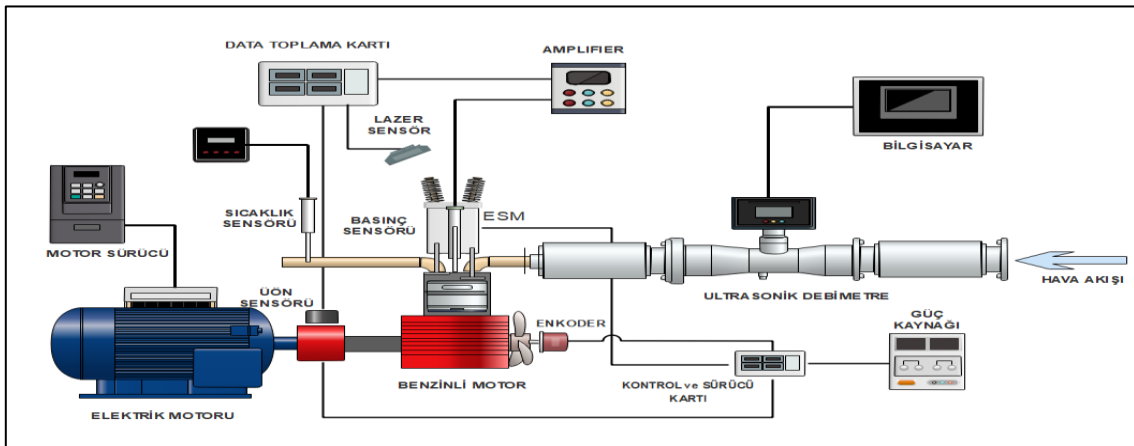
görülmüştür. 1200 dev/dk'den 1400 dev/dk'ya geçerken volumetrik verimin önemli bir şekilde arttığı ve 2600 dev/dk ve 2800 dev/dk değerlerinde maksimum seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Emme ve egzoz supaplarının açılıp kapanma zamanlarının motor devrinin artışıyla değişimi söz konusudur. Bu bağlamda motor devrinin artışı ile volumetrik verim artışı söz konusu iken diğer yandan da devrin artışı ile egzoz sistemindeki hidrolik kaybın artmasına ve egzoz basıncının ve testlerde de ortaya çıktığı gibi egzoz gaz sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bu durum, motorun bazı devir değişimlerinde devrin artmasıyla birlikte egzoz basıncının kısmen artması içeriye alınacak taze dolgunun girişini engelleyeceğinden dolayı volumetrik verimin azalmasına neden olduğu görülmüştür. Elektromekanik supap mekanizması ile bu devir geçişlerinde egzoz supabının kapanması geciktirilerek süpürme işinin daha iyi yapılması ve volumetrik verimin artırılması planlanmaktadır.

Tablo 13. Volumetrik Verim Değerleri

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

6.3 Elektromekanik Supap Mekanizması (ESM) Deney Sonuçları

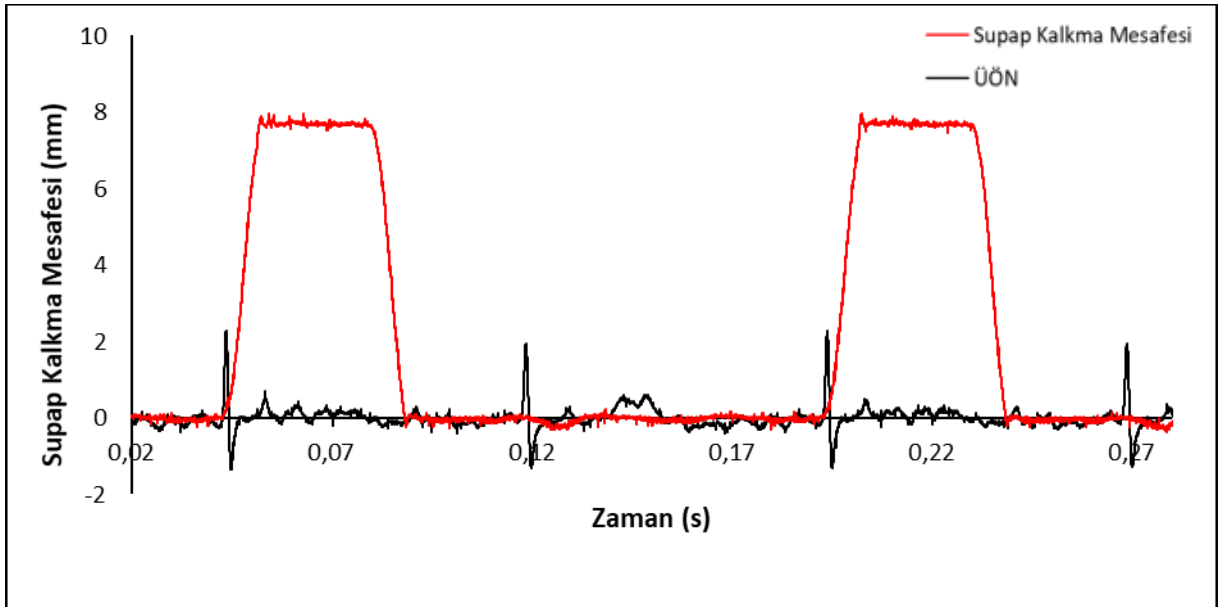
Klasik supap mekanizması ile testler yapıldıktan sonra içten yanmalı motordaki klasik kam mekanizması çıkarılmış ve yerine tasarlanan ESM takılmış ve klasik sistem ile yapılan testler tekrarlanmıştır. Ayrıca emme supabının açılma ve kapanma zamanının değiştirilmesinin volumetrik verime ve silindir içi basınca etkileri incelenmiştir. ESM ile yapılan tüm deneyler en az 3 kez tekrarlanmış ve bu testlerin ortalaması alınmıştır. Şekil 51'de ESM kullanılan test sistemi gösterilmiştir.



Şekil 51. ESM'li test düzeneği

6.3.1 ESM emme supabı profili

ESM ile klasik sisteme göre emme supabı profilinin daha geniş olması amaçlanmaktadır. Bu nedenle de emme zamanında silindir içerisine alınan hava miktarında ve dolayısıyla volumetrik verimde artış olması beklenmektedir. ESM için önemli parametrelerden biri de supabın açılma süresidir. Supabın açılma süresi bobin endüktansı, supap lift mesafesi, bobin akımları, yay kuvveti ve bobinlerdeki elektromanyetik kuvvet gibi değişkenlere bağlıdır. Bu proje kapsamında kullanılan motorun silindir kapağındaki kısıtlı alandan dolayı bobin çapları maksimum 38 mm ile sınırlanmıştır. Bu durumda tasarlanan optimum ESM'de supap açılma zamanı, 7,8 mm lift (supap kalkma mesafesi) mesafesi için 7,7 ms olarak ölçülmüştür. Bu sürenin azaltılması supap profilinin genişlemesini sağlayacaktır. Supap açılma süresini azaltmak için elektromanyetik kuvvetin artırılması bunun içinse bobin sarım sayısının artırılması gerekmektedir. Ayrıca, ESM'de hareketli kütle de sistem hızı için önem taşımaktadır. Tasarlanan sistemde hareketli kütle 102 g olarak ölçülmüştür. Supap hızını etkileyen diğer bir parametre ise yataklama problemleri ve sürtünme kayıplarıdır. Bu kayıpların minimuma indirilmesi supap hızında artış sağlayacaktır. Şekil 52'de 800 dev/dk'da klasik zamanlamada ESM emme supabı profili gösterilmiştir.



Şekil 52. 800 dev/dk'da ESM emme supabı profili

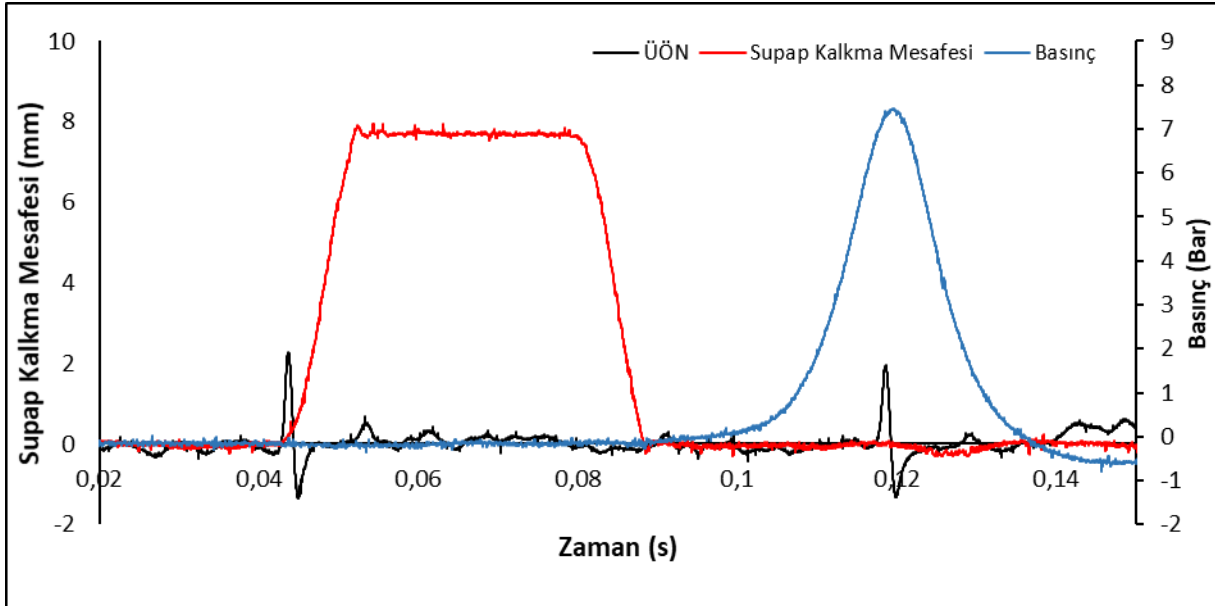
Klasik supap mekanizması emme supabı profili ile ESM emme supabı profili karşılaştırıldığında, supap profilinde önemli ESM artış sağlandığı görülmektedir. Ayrıca ÜÖN'dan önce 5 ve 10 KMA'da da testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda ortalama hava

tüketimi, maksimum silindir içi basıncı, ortam havası şartları, emme ve egzoz havası sıcaklıkları Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. ESM ile Yapılan Test Sonuçları

Devir / Supap Zamanlaması	P _{max} (Bar)	Emme (°C)	Egzoz (°C)	Hava Debisi (kg/h)	Nem (%)	P ₀ (hPa)
800 ESM	7,5	21,7	28,2	7,737	47,8	957
800 ESM 5 KMA Önce	7,4	21,9	27,6	7,643	46,1	958
800 ESM 10 KMA Önce	7,2	21,7	28,8	7,499	41,2	959

Bu sonuçlara göre 800 dev/dk'da klasik sistemde 7,446 kg/h saat olan ortalama hava tüketimi ESM ile 7,737 kg/h olarak ölçülmüştür. Ayrıca test sırasındaki ortam şartlarında havanın yoğunluğu ise 1,128 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre volumetrik verim %73,5 olarak bulunmuştur. Emme supabı ÜÖN'dan 5 KMA önce açıldığında volumetrik verim %72,6 10 KMA önce açıldığında ise %71,2 olarak hesaplanmıştır. Klasik sisteme göre volumetrik verimde %3,5 artış sağlanmıştır. Silindir içi basınçlarda da artış klasik sisteme göre yaklaşık 0,5 olmuştur. Şekil 53'de 800 dev/dk'da emme supabı ÜÖN'dan 5 KMA önce açıldığında zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği gösterilmiştir.



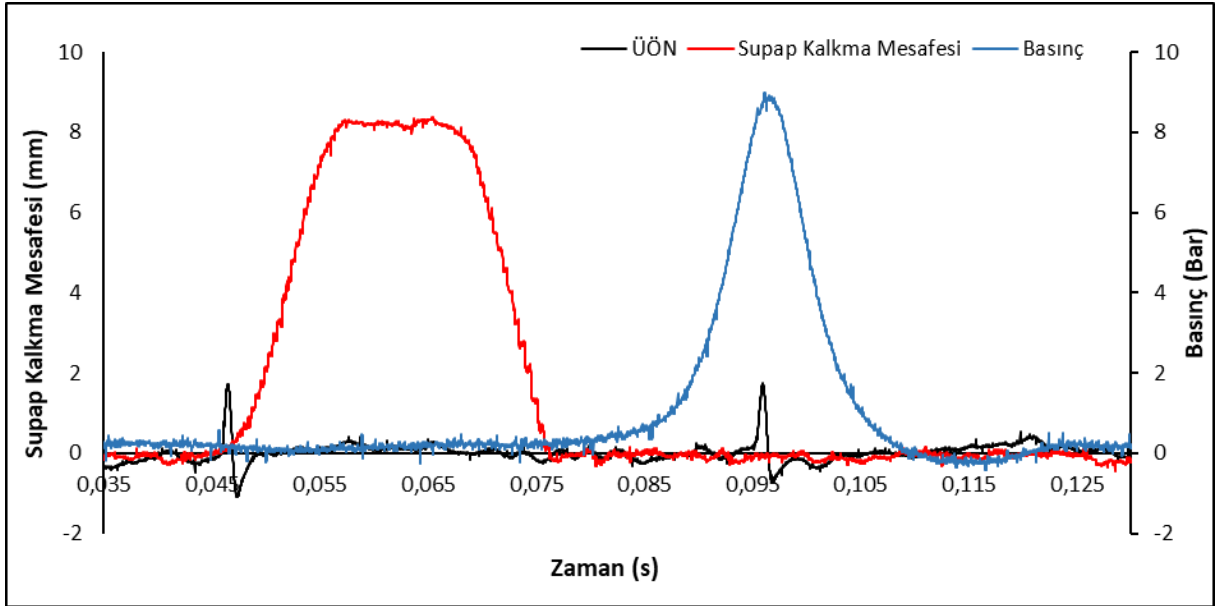
Şekil 53. 800 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

1200 dev/dk da yapılan test sonuçları Tablo 15'de verilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi 1200 dev/dk'da klasik sistemde 10,234 kg/h saat olan ortalama hava tüketimi ESM ile 11,165 kg/h

olarak ölçülmüştür. Test sırasındaki ortam şartlarında havanın yoğunluğu ise $1,14 \text{ kg/m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre volumetrik verim %69,9 olarak bulunmuştur. Emme supabı ÜÖN'dan 5 KMA önce açıldığında volumetrik verim %69,1, 10 KMA önce açıldığında ise %68,2 olarak hesaplanmıştır. Klasik sisteme göre volumetrik verimde %5,8 artış sağlanmıştır. Silindir içi basınçlarda da artış klasik sisteme göre 0,6 bar civarındadır. Şekil 54'de 1200 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği gösterilmiştir.

Tablo 15. 1200 dev/dk'da elde edilen test sonuçları

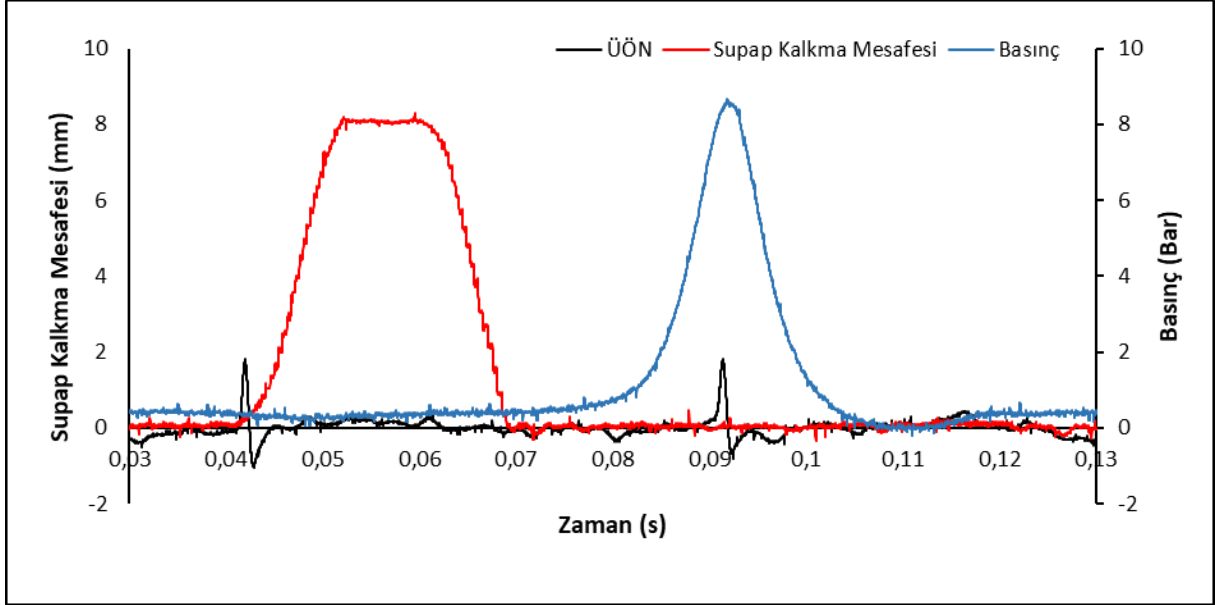
Devir	Pmax (Bar)	Emme (°C)	Egzoz (°C)	Hava Debisi (kg/h)	Nem (%)	P ₀ (hPa)
1200 ESM	9,4	21,9	33,7	11,165	35,0	967
1200 ESM 5 KMA Önce	9,2	21,1	33,1	11,046	34,7	967
1200 ESM 10 KMA Önce	8,9	20,8	33,2	10,897	35,1	967



Şekil 54. 1200 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

Ayrıca 1200 dev/dk'da emme supabı kapanma zamanı standart zamanlamaya göre 15 KMA öne çekilerek de testler yapılmıştır. Bu testler sonucunda silindir içerisine alınan ortalama hava miktarı $11,311 \text{ kg/h}$ olarak ölçülmüştür. Bu testler sonucunda volumetrik verim %70,9 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca silindir içi maksimum basınç değeri de klasik zamanlamaya göre 0,2 bar artış göstermiştir. Şekil 55'de 1200 dev/dk'da emme supabı kapanma zamanı

standart zamanlamaya göre 15 KMA öne çekilerek zamana bağlı supap profili, ÜÖN ve silindir içi basınç değerleri gösterilmiştir.

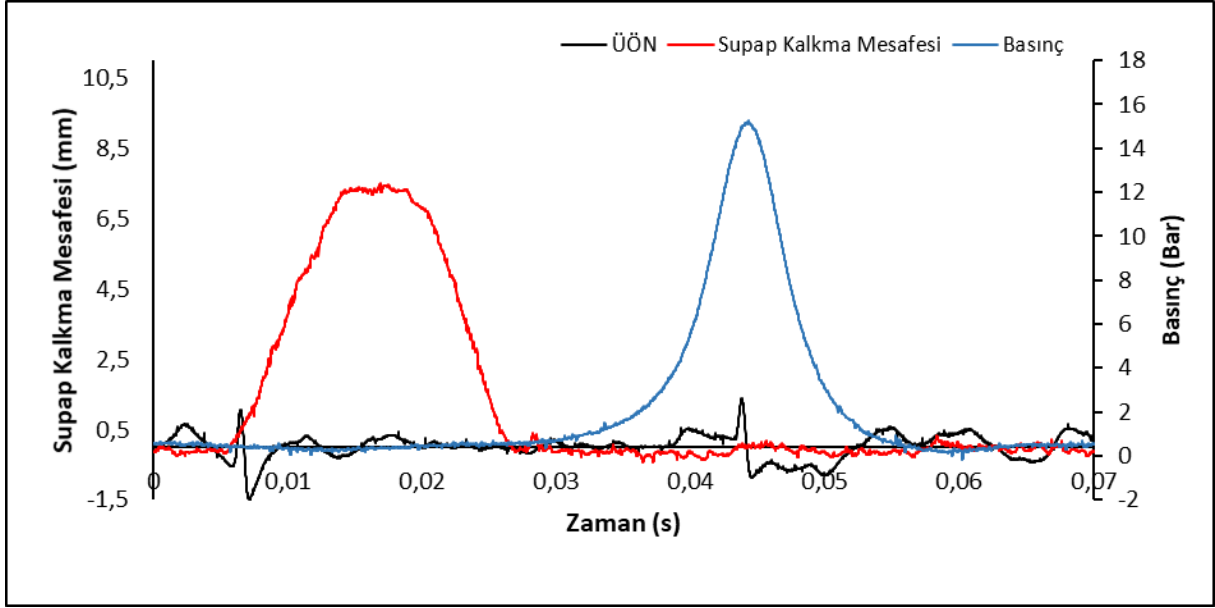


Şekil 55. 1200 dev/dk'da emme supabı kapanma zamanı standart zamanlamaya göre 15 KMA öne çekilerek elde edilen supap profili

Tablo 16'da verilen değerlere göre 1600 dev/dk'da klasik sistemde 13,218 kg/h saat olan ortalama hava tüketimi ESM ile 13,976 kg/h olarak ölçülmüştür. Ayrıca test sırasındaki ortam şartlarında havanın yoğunluğu 1,144 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre volumetrik verim %66,2 olarak tespit edilmiştir. Emme supabı ÜÖN'dan 5 KMA önce açıldığında volumetrik verim %64,9, 10 KMA önce açıldığında ise %64,1 olarak hesaplanmıştır. Klasik sisteme göre volumetrik verimde %4,1 artış elde edilmiştir. Klasik sisteme kıyasla silindir içi basınçlarda da yaklaşık 0,3 bar artış sağlanmıştır. Şekil 56'da 1600 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği gösterilmiştir.

Tablo 16. 1600 dev/dk'da elde edilen test sonuçları

Devir	Pmax (Bar)	Emme (°C)	Egzoz (°C)	Hava Debisi (kg/h)	Nem (%)	P ₀ (hPa)
1600 ESM	15,9	20,7	31,8	14,159	36,1	967
1600 ESM 5 KMA Önce	15,7	20,9	32,1	13,872	35,5	967
1600 ESM 10 KMA Önce	15,6	21,0	32,0	13,713	35,4	967

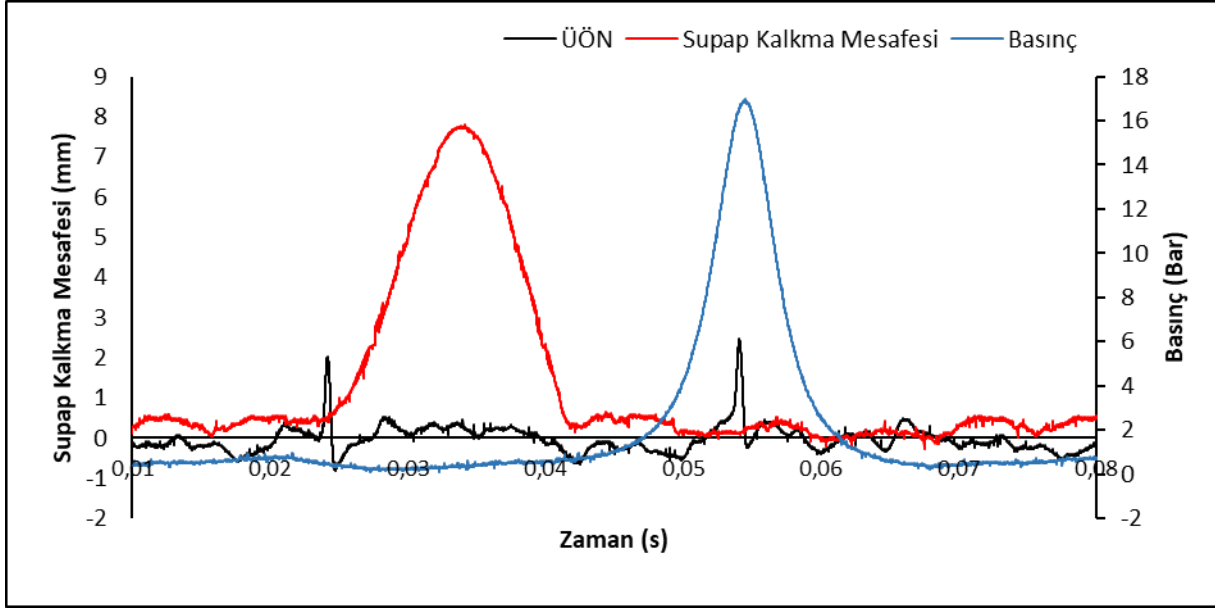


Şekil 56. 1600 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

2000 dev/dk'dan sonra elde edilen ESM supap profili klasik sistem supap profili ile benzerlik göstermektedir. Üst devirlere çıkıldıkça ESM supap profili için supap açılma hızı oldukça önem taşımaktadır. Supap açılma hızı ne kadar yüksek olursa supap profili de o oranda genişleyecek ve silindir içerisine alınacak hava miktarı da buna paralel olarak artacaktır. Yapılan ölçüm sonuçları Tablo 17'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre klasik sistemde 19,294 kg/h saat olan ortalama hava tüketimi ESM ile ortalama 19,073 kg/h olarak ölçülmüştür. Ayrıca test sırasındaki ortam şartlarında havanın yoğunluğu ise 1,1271 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre volumetrik verim %72,5 olarak bulunmuştur. Emme supabı ÜÖN'dan 5 KMA önce açıldığında volumetrik verim %71,5 10 KMA önce açıldığında ise %71,2 olarak hesaplanmıştır. ESM, klasik sistemle karşılaştırıldığında volumetrik verimler çok yakın değerlerde çıkmıştır. Silindir içi basınçlarda ise artış klasik sisteme göre yaklaşık 0,3 bar olmuştur. Şekil 57'de 2000 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği gösterilmiştir.

Tablo 17. 2000 dev/dk'da elde edilen test sonuçları

Devir / Supap Zamanlaması	Pmax (Bar)	Emme (°C)	Egzoz (°C)	Hava Debisi (kg/h)	Nem (%)	P ₀ (hPa)
2000 ESM	16,9	23,8	36,3	19,073	33,4	962
2000 ESM 5 KMA Önce	16,7	24,2	37	18,821	36,7	962
2000 ESM 10 KMA Önce	16,6	23,5	36,4	18,737	35,7	962

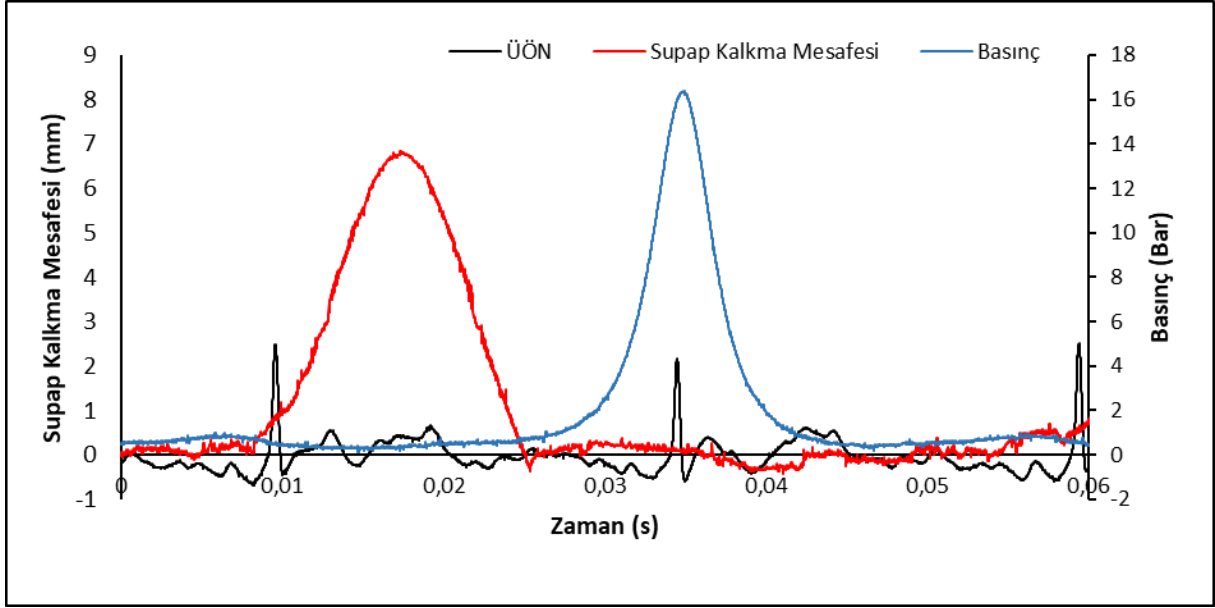


Şekil 57. 2000 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

2400 dev/dk'da yapılan testlerde elde edilen sonuçlar klasik sistemle benzerlik göstermektedir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre klasik sistemde 28,797 kg/h saat olan ortalama hava tüketimi ESM ile ortalama 28,992 kg/h olarak ölçülmüştür. Ayrıca test sırasındaki ortam şartlarında havanın yoğunluğu ise 1,1307 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre volumetrik verim %91,5 olarak bulunmuştur. Emme supabı ÜÖN'dan 5 KMA önce açıldığında volumetrik verim %90,8 10 KMA önce açıldığında ise %90,3 olarak hesaplanmıştır. ESM ile klasik sistem karşılaştırıldığında volumetrik verimde %1'lik bir artış olduğu görülmüştür. Silindir içi basınçlarda ise artış klasik sisteme göre yaklaşık 0,2 bar olmuştur. Şekil 58'da 2400 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği Tablo 18'de ise 2400 dev/dk'da elde edilen test sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 18. 2400 dev/dk'da elde edilen test sonuçları

Devir / Supap Zamanlaması	Pmax (Bar)	Emme (°C)	Egzoz (°C)	Hava Debisi (kg/h)	Nem (%)	P ₀ (hPa)
2400 ESM	16,7	22,8	40,3	28,992	37,1	962
2400 ESM 5 KMA Önce	16,5	22,9	41,1	28,759	37	962
2400 ESM 10 KMA Önce	16,3	23,1	42,2	28,602	36,9	962



Şekil 58. 2400 dev/dk'da zamana bağlı olarak ÜÖN, supap profili ve silindir içi basınç grafiği

ESM ile 2400 dev/dk'dan sonra 2600 dev/dk'da testler gerçekleştirilmiş fakat bu devirde klasik sistemde supap açık kalma süresi 14,1 ms olduğundan ESM aynı supap açılma şartlarını sağlayamamıştır. ESM' da supabın kapalı durumdan tam açık duruma geçme süresi 7.7 ms ve kapanma süresi de aynı olduğundan ESM'nda supabın açılıp kapanması için geçen toplam süre 15,4 ms olmaktadır. Bu durumda da klasik açılma zamanlarında testler yapılamamıştır. Ancak EmSK geciktirilerek sistemin çalışması mümkün olmuştur. Bu nedenle 2800 ve 3000 dev/dk'da testler yapılmamıştır.

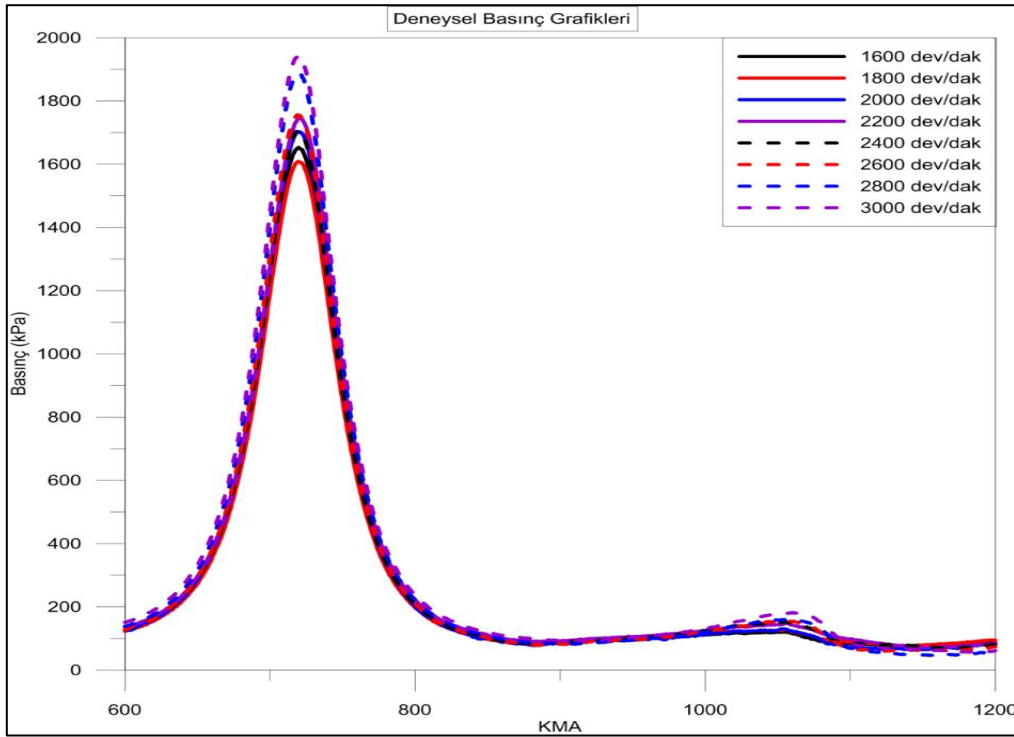
6.4 CFD analiz sonuçları

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 deneysel ve analiz çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Emme ve egzoz manifoldu sıcaklıklarının ölçülmesi için 0,1 derece hassasiyetli iki termokupl kullanılmıştır. Emme ve egzoz basınç değerleri için ayrı bir basınçölçer kullanılmamış ve silindir içi basınç değerlerinden yararlanılmıştır. Emme ve egzoz manifoldu sıcaklık ve basınç değerleri Tablo 19'da verilmiştir. Simülasyon çalışmasında deneysel olarak ölçülen Tablo 19'daki değerler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve deneysel veri ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Tablodaki sıcaklık değerleri Kelvin, basınç değerleri ise Pascal birimindedir.

Tablo 19. Deneysel çalışmadan elde edilen emme (giriş) ve egzoz (çıkış) hava sıcaklığı ve basıncı değerleri

Devir	Emme Sıcaklığı	Egzoz Sıcaklığı	Emme Basıncı	Egzoz Basıncı	EmSK Basıncı	EmSK Sıcaklık
1600	293,4	307,7	75204	93510	102606	293,4
1800	293,5	311,1	94070	109835	102146	293,5
2000	293,5	314,1	79024	101283	104213	293,5
2200	293,6	318,8	79422	101601	105011	293,6
2400	293,6	322,7	97515	101480	103787	293,6
2600	293,7	325,2	98998	102227	107889	293,7
2800	294,0	329,9	99799	101717	118195	294,0
3000	294,1	330,8	98999	102513	118573	294,1

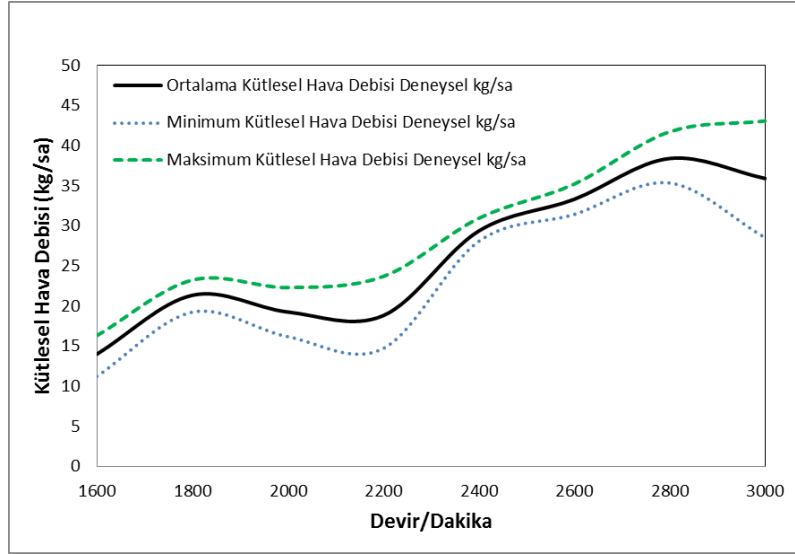
Simülasyon çalışması için başlangıç zamanlamasının emme supabı başlangıcı seçilmesi nedeniyle deneysel veri aralığı analize aynı aralıkta alınmıştır. Bu nedenle Şekil 59'daki silindir içi basınç grafiklerinin veri aralığının 600-1200 KMA arasında olduğu görülmektedir. 1600-3000 dev/dk aralığında 200 dev/dk artımı ile klasik sistemde silindir içi basınç ölçümleri alınmıştır.



Şekil 59. Deneysel çalışmadan elde edilen silindir içi basınç grafikleri

Ultrasonik debimetre cihazı ile silindire giren havanın kütleli debi ölçümleri 180 saniye boyunca alınarak minimum, ortalama ve maksimum hava kütleli debileri tespit edilmiştir. Bu veriler Şekil 60'da gösterilmiştir. Testler kullanılan elektrik motorunun maksimum devri olan 3000 dev/dk'ya kadar yapılmıştır. Grafikte görüldüğü üzere 1800 dev/dk için hava kütleli

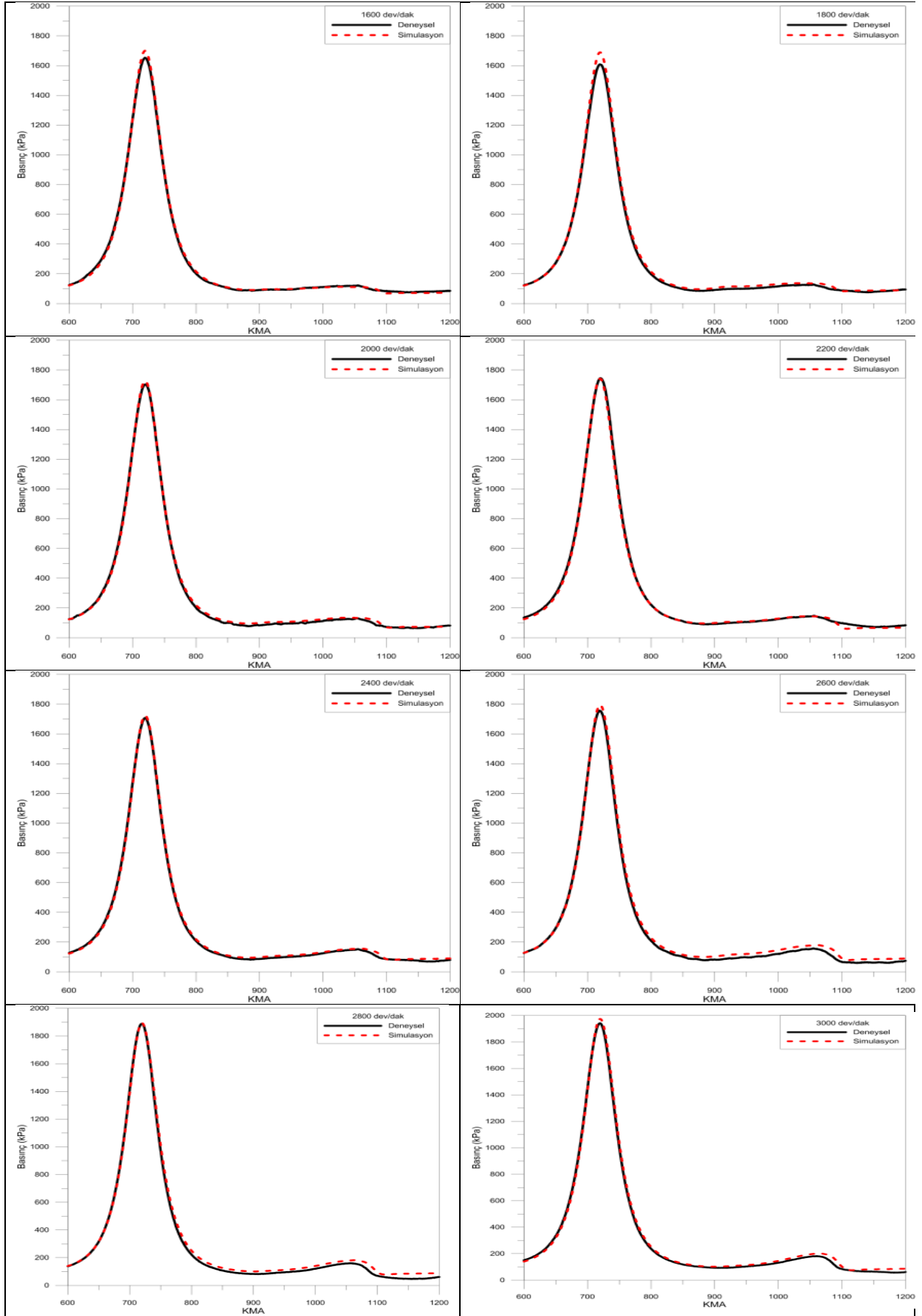
debisinin arttığı ve sonra tekrar azalarak 2400 dev/dk itibari ile arttığı ve 2800 dev/dk'da maksimum değere ulaştığı görülmektedir.



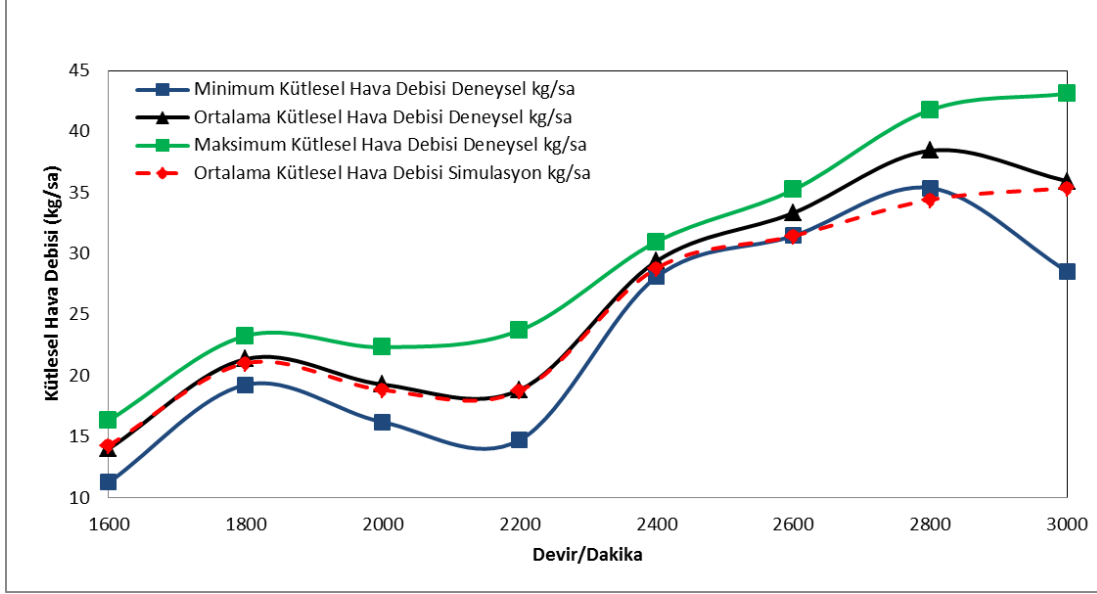
Şekil 60. Deneysel olarak ölçülen kütleli hava debisi

Şekil 61'de 1600-3000 dev/dk aralığında 8 farklı devir için krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği görülmektedir. Grafikler incelendiğinde emme ve egzoz prosesleri yapılırken ki basınç grafikleri ve aynı zamanda sıkıştırma esnasında da basınç değerlerinin deneysel ve simülasyon sonuçlarının birbiri ile örtüştüğü görülmektedir. Bunun yanında silindir içi basınç değerleri incelendiğinde hem deneysel hem de simülasyonda supap bindirme sürecindeki basınç artışının etkisi açıkça 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.

Motorun emme havası debisi ölçümlerinin simülasyon çalışması sonucu elde edilen verilerle karşılaştırılması Şekil 62'de görülmektedir. Grafik incelendiğinde genel olarak motor devrinin artması ile birlikte hava tüketiminin arttığı görülmektedir. Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçlarında da görüldüğü üzere; 1800 dev/dk'da kütleli hava debisinin yaklaşık 21 kg/sa civarına yükseldiği ve sonrasında düşerek 2200 dev/dk şartında kütleli hava debisinin yaklaşık 18 kg/sa olduğu belirlenmiştir. Daha sonraki devirlerde yükselerek sürekli bir artış gösterdiği ve maksimum debinin 2800 dev/dk'da yaklaşık olarak 36 kg/sa olduğu görülmüştür.

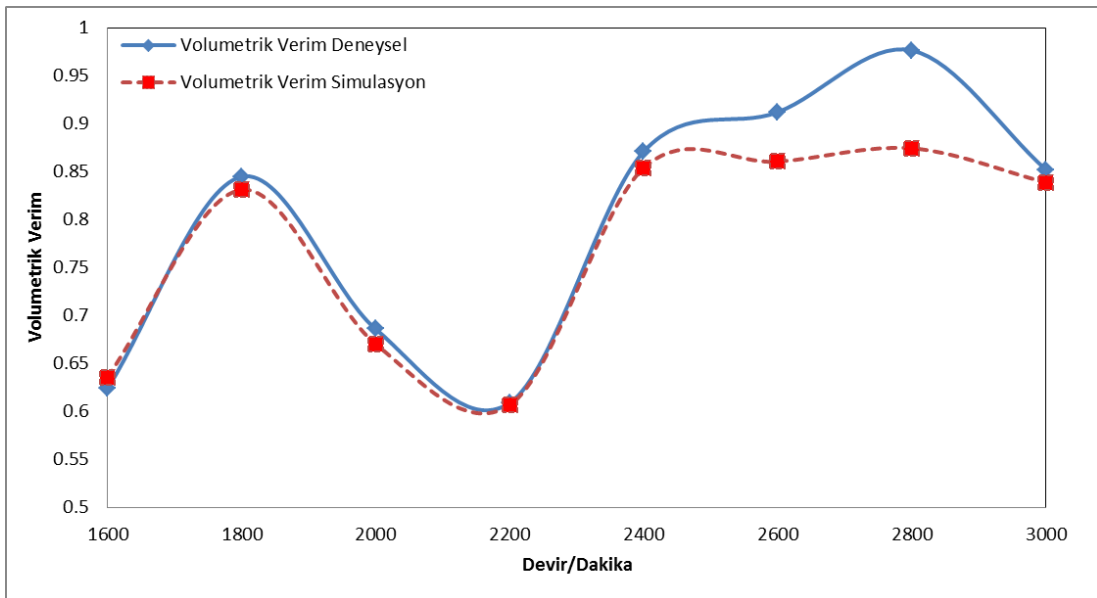


Şekil 61. Silindir içi basınç grafikleri



Şekil 62. Deneysel ve simülasyon kütleli hava debisinin devir ile değişimi

Motor için en önemli göstergelerden biri olan volümetrik verim değerleri Şekil 63'de verilmiştir. Deneysel ve simülasyon çalışmalarında elde edilen sonuçların genel olarak birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kütleli hava debisi grafiğine benzer bir durum bu grafikte de görülmektedir. 2600 ve 2800 dev/dk motor hızlarında, volümetrik verim değerlerinde deneysel ve simülasyon farkının açıldığı anlaşılmaktadır. 1600 dev/dk civarında volümetrik verimin %62 civarında olduğu ve 1800 dev/dk'da %85 civarına yükselerek ardından düştüğü ve 2400 dev/dk itibari ile yükselerek ortalama %90 civarında devam ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 63. Volümetrik verimin devir ile değişim grafiği

Deneysel ölçüme benzer şekilde emme manifoldu kesitinden geçen kütleli akış debisinin ölçümü sağlanmıştır. Aşağıdaki tablodaki değerler incelendiğinde alınan deneysel verilerin simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Sadece 2800 dev/dk için bakıldığında analiz sonucunun ortalama değerden uzak olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin giriş ve çıkış basınç değerlerinde farklılıktan meydana geldiği ve bunun yanında havanın geri tepme olayının yüksek devirlerde daha yüksek gerçekleşmesi nedeniyle deneyselden farklılık oluşabileceği nedeniyle böyle bir durum gözlemlenmiştir.

Tablo 20. Kütleli hava akış debilerinin deneysel ve analiz verileri

Devir	Kütleli Hava Akış Debisi Simülasyon (kg/h)	Ortalama Kütleli Hava Akış Debisi Deneysel (kg/h)	Minimum Kütleli Hava Akış Debisi Deneysel (kg/h)	Maksimum Kütleli Hava Akış Debisi Deneysel (kg/h)
800	8,79351	7,446	5,274	9,28
1200	12,86339	10,234	8,68	11,769
1600	16,053	13,218	11,276	16,353
2000	20,26022842	19,294	16,222	22,346
2800	30,14417	36,478	32,454	41,128

Önerilen elektromekanik supap mekanizması uygulamasının etkinliğini daha belirgin olarak belirleyebilmek için hesaplamalı akışkanlar mekaniği yazılımı ile parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmada, elektromekanik supap 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 açılmasının 5 derece erken ve 5 derece geç olması (EgSA -5 ve EgSA +5) durumları incelenmiştir. Deneysel olarak standart kam profili ile yapılan testler ile doğrulama yapıldıktan sonra bu parametrik çalışmanın ön girdileri alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir.

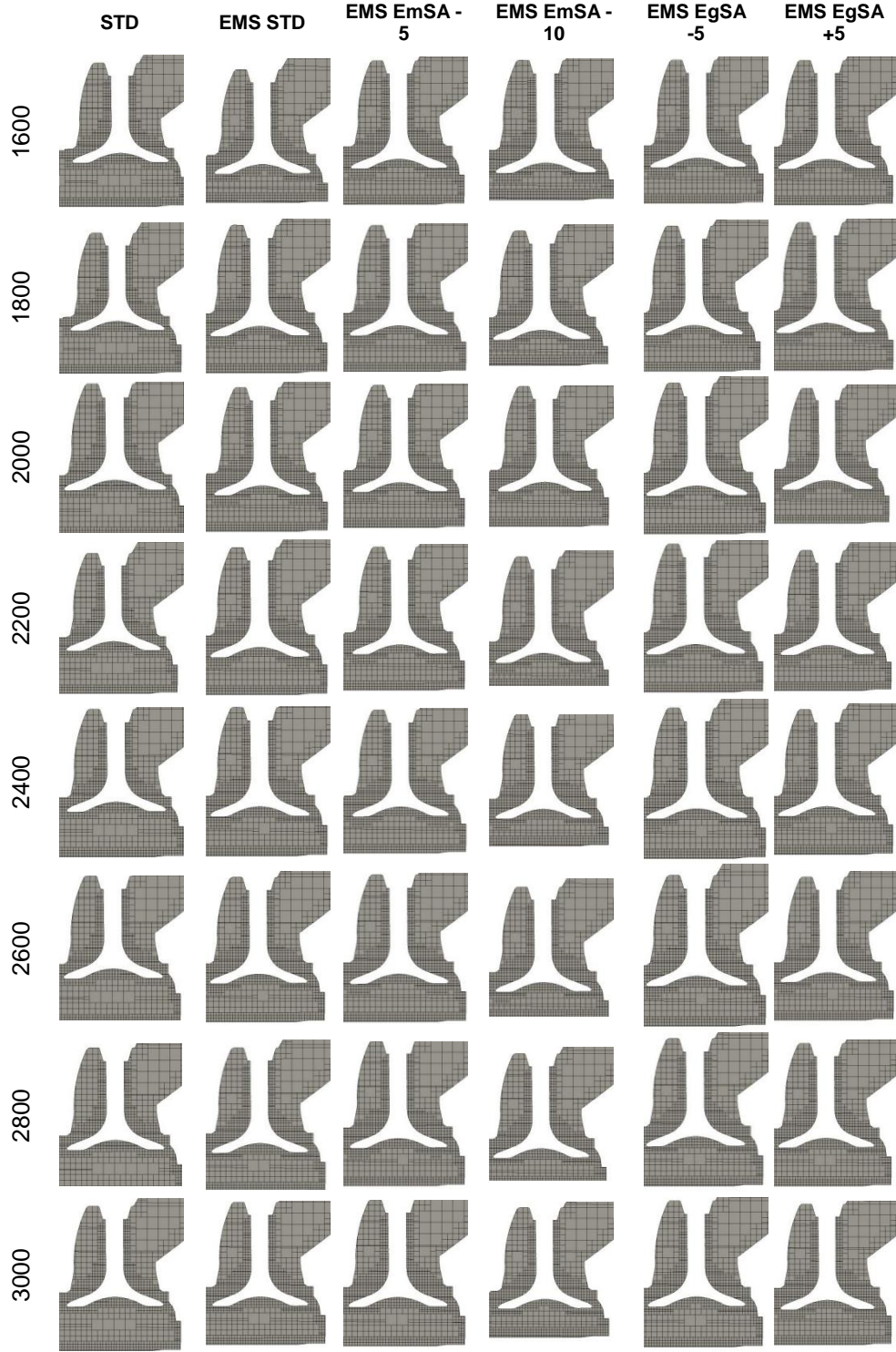
Bu adımdan sonra gerekli yüzey isimlendirmeleri ve yüzey tanımlamaları yapıldıktan sonra ağ yapısına geçilmektedir. Ağ yapısı için iki referans boyut girilmektedir. Bu referans boyutlardan ilki 0,843 mm olarak girilmiştir. Diğer referans boyutu olarak global ağ ise 4 mm girilmiş ve ardından ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu yazılımda gerekli sıcaklık ve basınç parametreleri girildikten sonra 1600-3000 dev/dk aralığında 200 dev/dk aralıklar ile elektromekanik supap mekanizması için analizler gerçekleştirilmiştir.

Elektromekanik supap mekanizma kısmındaki çalışma, deneysel olarak çalışma zorluğundan dolayı literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda elektromekanik supap mekanizmasında supabın sinyal verildikten sonra ne kadar sürede açıldığının tespit

edilmesi gerekmektedir. Elektromekanik supap mekanizmasına sinyal verildikten sonra supabın 7.7 ms içerisinde tamamıyla açıldığı görülmüştür. Bu açılma süresi 2500 dev/dk dan sonra çalışma hızının yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle yüksek devirlerdeki simülasyon çalışmalarına literatürdeki simülasyon çalışmalarından alınan 3,6 ms açılma zamanı kullanılmıştır. Bu durum ele alınarak klasik supap zamanlamasına göre elektromekanik supap kalkma profilleri oluşturulmuştur. Bu profiller Şekil 64’de gösterilmiştir. Supap profilleri incelendiği zaman standart 3.6 ms açılma süresinin 1600 dev/dk için 35 krank mili açısına, 2000 dev/dk için 43 krank mili açısına, 2400 dev/dk için 52 krank mili açısına, 2800 dev/dk için 61 krank mili açısına denk geldiği hesaplanmış ve bu duruma göre Matlab yazılımı yardımıyla profiller oluşturulmuştur. Görüldüğü üzere dev/dk artması ile elektromekanik supap mekanizmasının sabit açılma tepkisine göre supap kalkma profilinin daralmıştır. Bunun anlamı yaklaşık 2800 dev/dk’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 Ansys Forte yazılımına girildikten sonra simülasyon çalışmalarına devam edilmiştir. Şekil 65’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 elektromekanik supap profillerinde ise 2800 dev/dk ve 3000 dev/dk dışında diğer devirlerde tamamıyla açıldığı görülmektedir. EmSA -5 ve EmSA -10 durumlarında supapların daha erken açıldığı ve daha yüksek seviyede olduğu anlaşılmaktadır. EgSA -5 ve EgSA +5 durumlarında ise emme supabının zamanı değişmediği ve EMS STD ile aynı seviyede açıldığı görülmektedir.

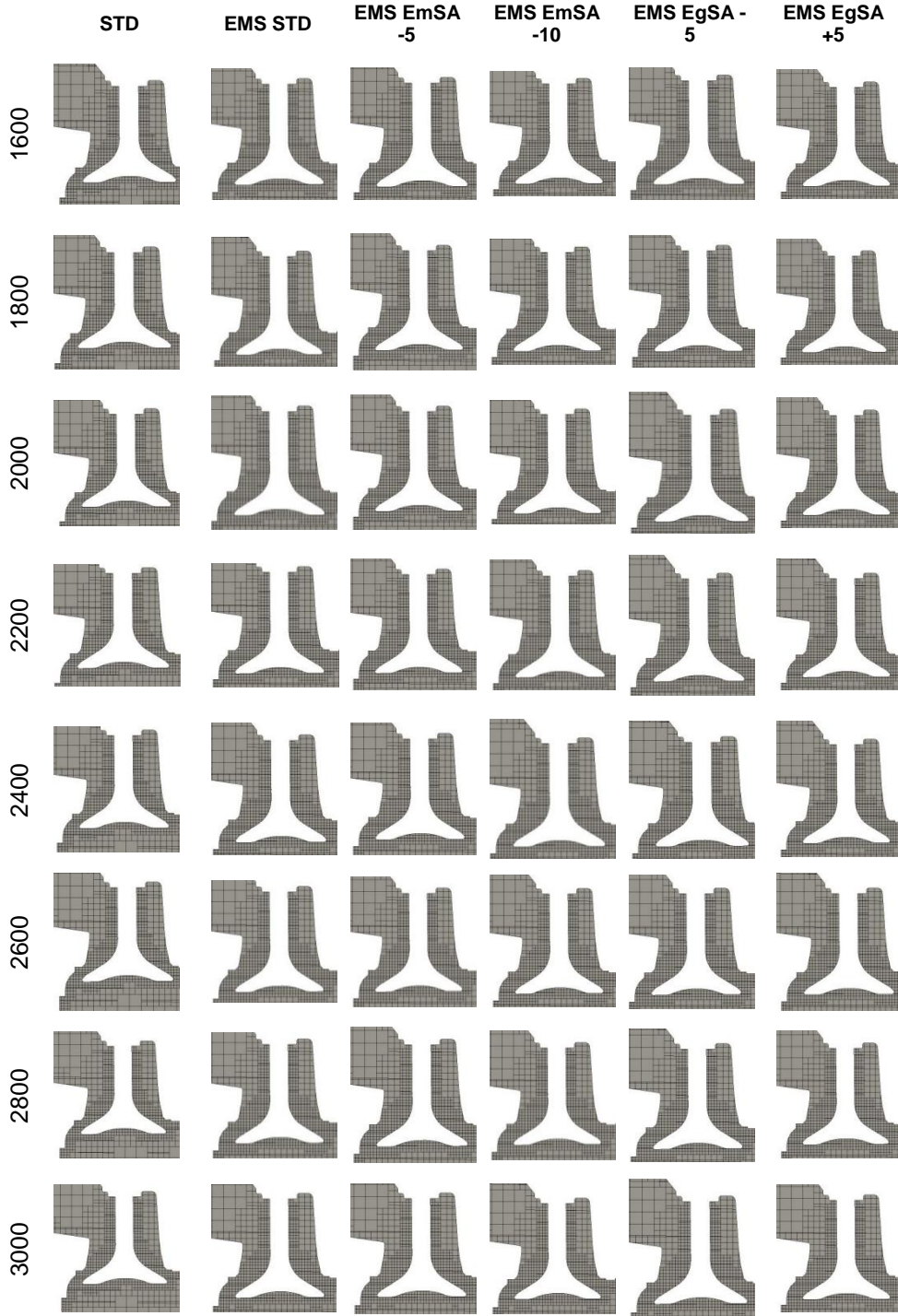
Supap hareketinin dinamik modelinin düzgün çalışabilmesi için dörtgensel ve düzenli ağ yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Yazılım, adaptif ağ yapısı yenileme tekniği sayesinde anlık ağ sayısını değiştirerek analiz gerçekleştirmektedir. Yazılım akışın hızlandığı bölgelerde ağ sayısını arttırarak çözüm hatalarını azaltmaktadır. Ayrıca akışın düşük hızlarda olduğu bölgelerde ağ sayısını azaltarak daha hızlı çözüm yapabilme özelliğine sahiptir.



Şekil 65.1120 KMA Emme supabı dinamik ağ yapısı görüntüleri

Ağ yapısını gösteren şekillerde de görüldüğü gibi, supabın etrafında daha yoğun bir ağ yapısı oluşmuş diğer bir ifadeyle akışın yoğunlaştığı bölgelerde daha küçük ve yoğun ağlar oluşturarak iyi bir çözüm sağlamıştır. Kalan kısımlarda daha az ağ kullanarak toplam çözüm süresinin kılmasını sağlamaktadır.

Şekil 66'da egzoz supaplarının 900 KMA anındaki ağ yapısı görüntüleri verilmiştir. Egzoz supabının 855 KMA'da açılmaya başladığı ve bu anda tamamen kapalı olduğu, 970 KMA'da ise standart supap profiline göre tamamıyla açıldığı tespit edilmiştir. Yani 900 KMA esnasında standart supap profiline göre tam olarak açılmadığı fakat elektromekanik supap profillerinde ise 2800 dev/dk ve 3000 dev/dk dışında diğer devirlerde tamamıyla açıldığı görülmektedir.



Şekil 66. 900 KMA Egzoz Supabı dinamik ağ yapısı görüntüleri

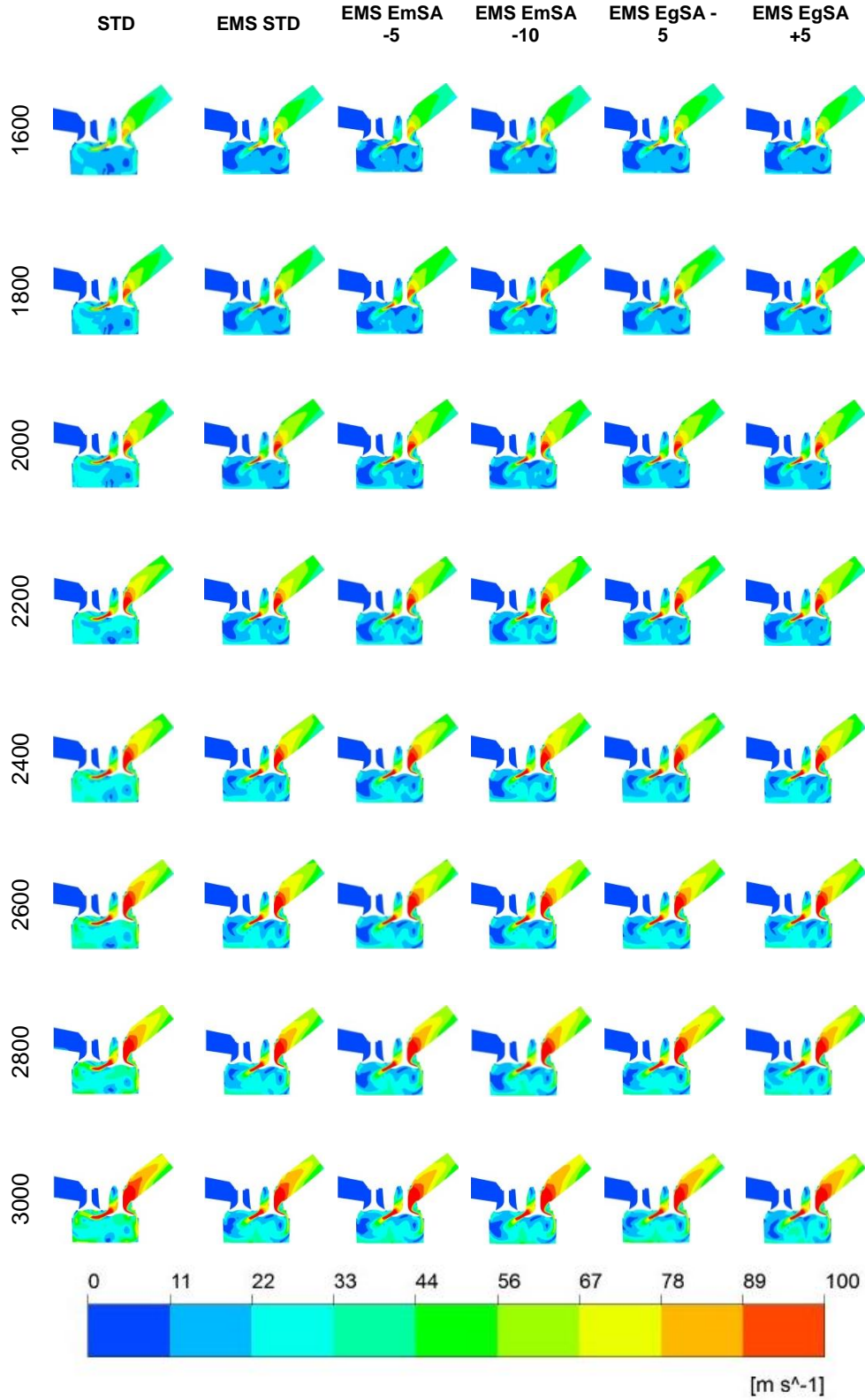
Emme prosesi esnasındaki hız vektörlerinin yanma verimine etkisi olduğu için emme prosesi yapılırken ki krank mili açıları hava akış hız görselleri için seçilmiştir. Emme supabının açılma zamanı 1080 KMA'dır. Bu zamanlamaya göre farklı KMA'daki hava partiküllerinin hareketleri ve hızları görsel olarak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

Şekil 67'de hava akış hız dağılımının 1160 KMA anındaki görüntüleri sunulmuştur. 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 esnasındaki 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 kullanılmıştır. Bu renk skalası tüm durumlar için 0-100 m/s aralığında alınarak görseller eş olacak şekilde düzenlenmiştir. Şekil 67'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 dolayı, akış kesiti çok hızlı genişlemiş ve bu nedenle akış hızları genel olarak standart kam profiline göre 1160 KMA'da daha da düşmüştür.

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 m/s değerlerine kadar yükseldiği belirlenmiştir.

Şekil 68'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. Şekil incelendiğinde, motor devrinin artması ile genel hava hareketlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Pistonun tam olarak AÖN'ya ulaşmadığı göz önünde bulundurulursa; vakumun artması ve silindir içi basıncın düşmesinden dolayı EMS durumlarının neredeyse tamamında akış hızları genel olarak standart kam profiline göre 1200 KMA'da daha yüksek olmuştur.



Şekil 67. 1160 KMA Silindir içi ve manifold hız dağılımı



Şekil 68. 1200 KMA Silindir içi ve manifold hız dağılımı

Hava akış hız dağılımının 1260 KMA anındaki görselleri Şekil 69'da gösterilmiştir. Supapların kapanmaya başladığı ve 1300 KMA'da tamamiyle kapanacağından dolayı hacim azalmaya başlamakta ve silindir içi hava miktarının ve basıncın artması ile birlikte silindir içi hava hareketleri azalmaktadır.



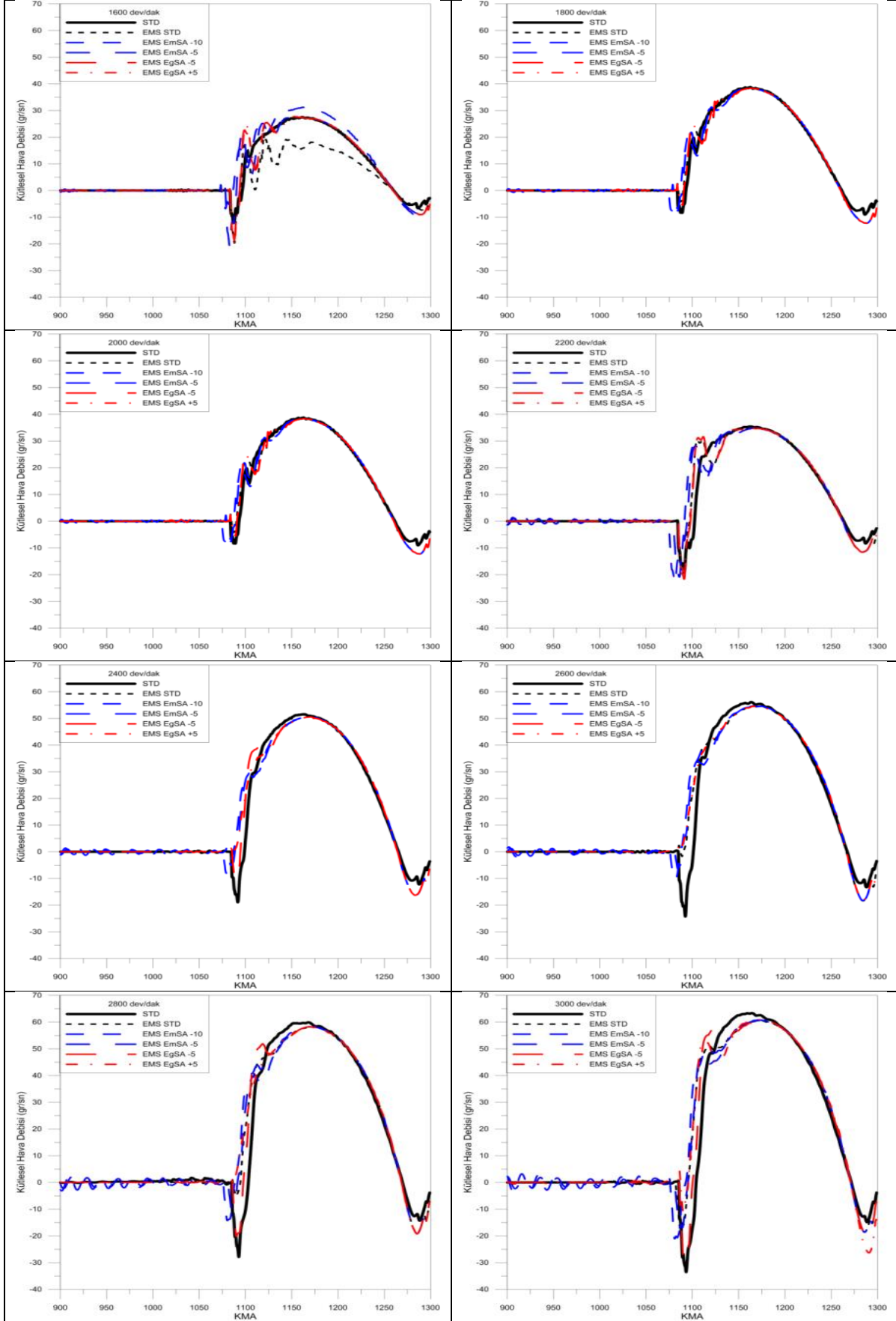
Şekil 69. 1260 KMA Silindir içi ve Manifold hız dağılımı

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

Şekil 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 m/s aralığına kadar yükseldiği şekilden anlaşılmaktadır.

Şekil 70'de ise analiz verilerinden elde edilen emme manifoldu kesitinden içeri giren hava kütle debisi değişimi görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere başta silindir içine hiç hava hareketi olmadığı için 0 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 içindeki iç basıncın artması neticesinde içeri hava girmesinden ziyade havanın ters akışa döndüğü ve manifolddan dışarı yönlü hareket ettiği ardından silindir içine doğru hava akışının artması ile birlikte kütleli hava debisinin artışa geçtiği ve ortalama olarak tüm devirler için yaklaşık olarak 1150 KMA değerinde maksimum değerine ulaştığı bunun da 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 durumlarının tümünde böyle bir durum oluşmamaktadır. Bu durumun egzoz supabı kapanıp emme supabı açılırken silindir içi basıncın artışının az olduğundan dolayı olduğu anlaşılmaktadır. Tüm durumlar için emme manifoldu kütleli hava debisinin maksimum 40-65 gr/sn aralığında olduğu, genel olarak debinin artışının devir ile orantılı belirlenmiştir. 1260 KMA'dan sonra pistonun alt ölü noktayı geçtiği ve emme prosesinin hala devam ettiği görülmektedir. Burada egzoz supabı açılmadığı için de emme manifolduna ters akış olduğu görülmektedir. Bu nedenle emme supabının geç kapanması özellikle yüksek devirlerde çok arttığı 3000 dev/dk'da ise ters hava akışı hızının yaklaşık 20 gr/sn civarına kadar yükseldiği görülmektedir. Düşük devirlerde ise hava akışının maksimum 10 gr/sn olduğu görülmektedir.

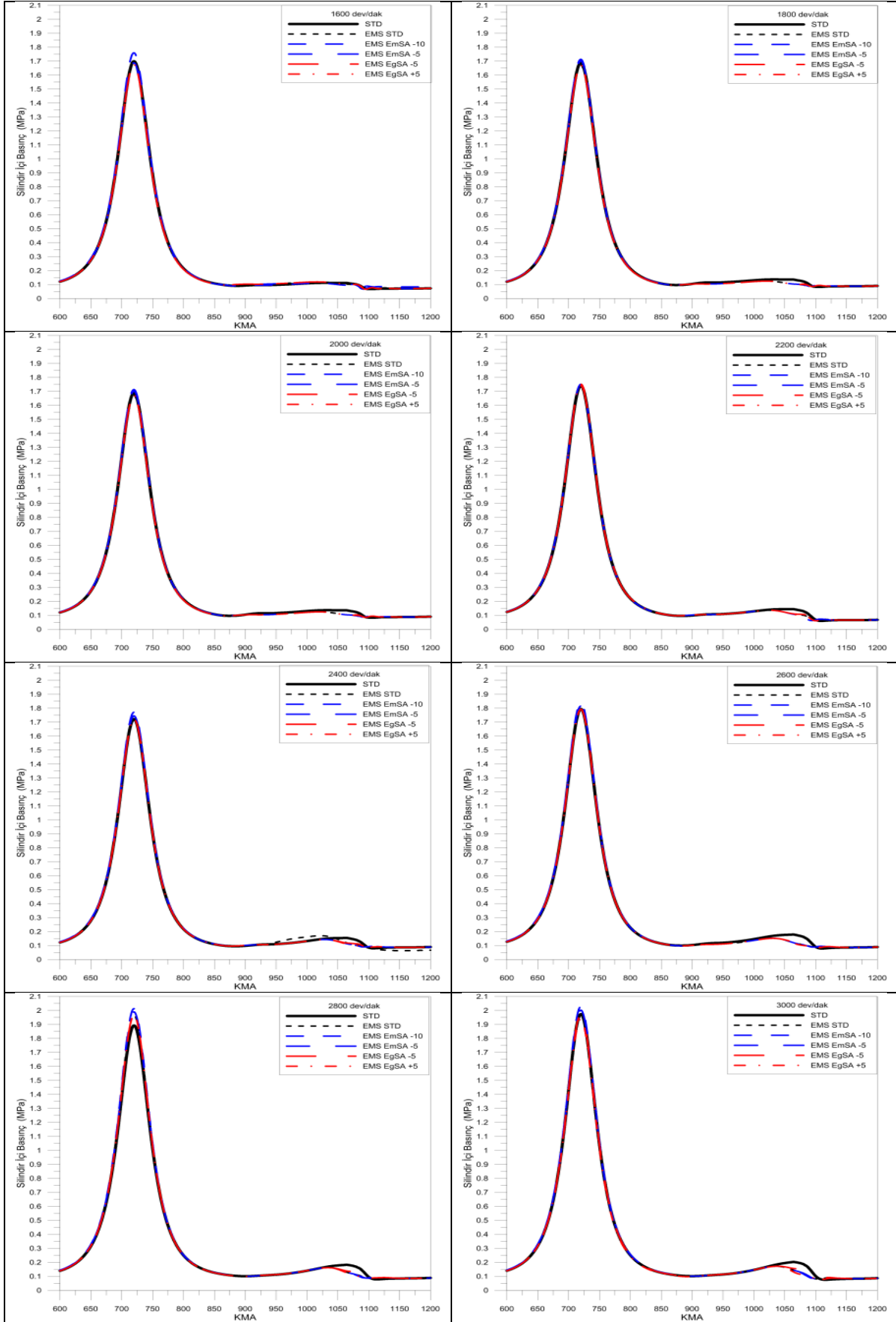


Şekil 70. Silindir içindeki hava miktarının değişimi

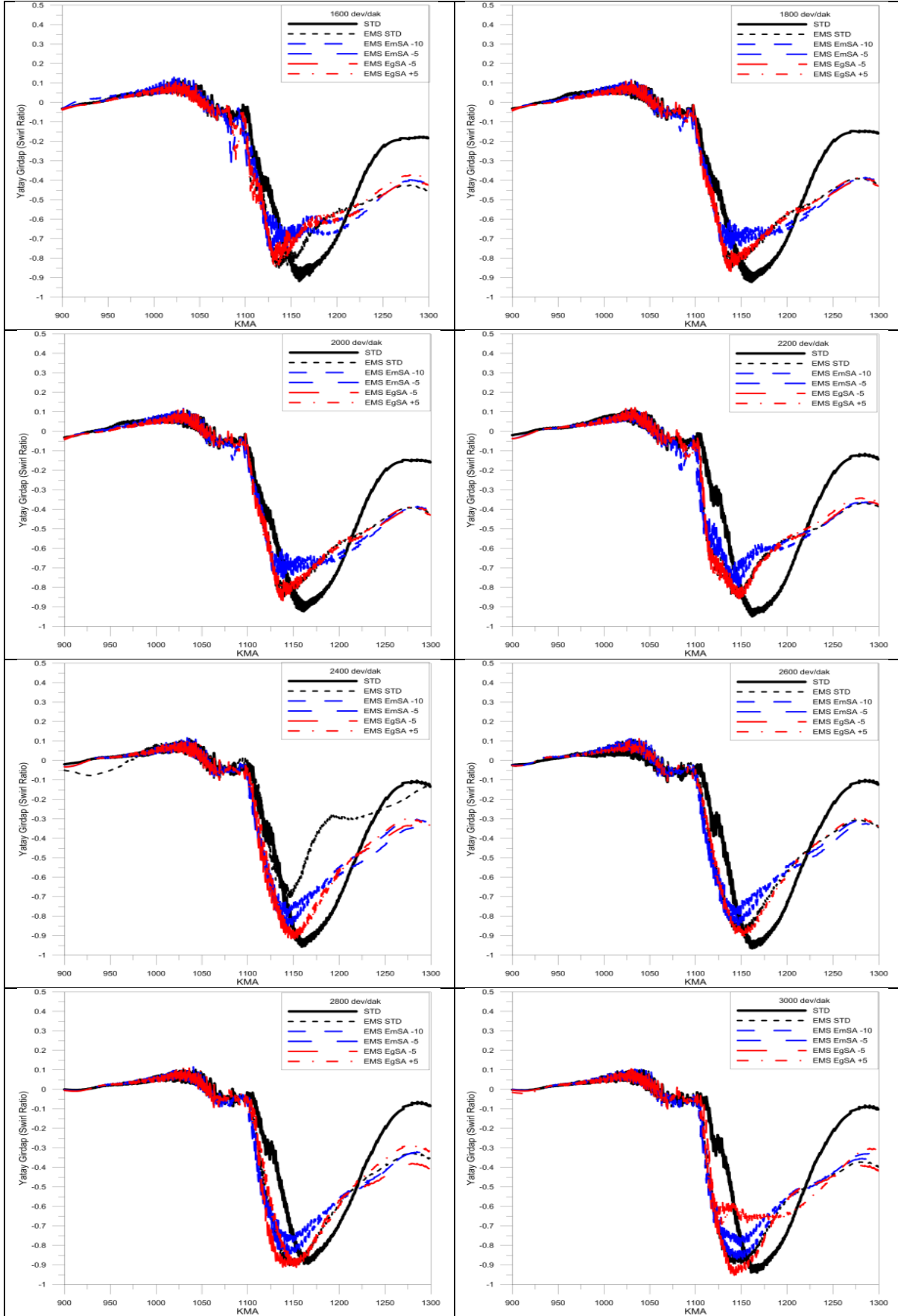
Şekil 71’de analiz verilerinden elde edilen silindir içi basınç değerlerinin KMA ile değişimi görülmektedir. Grafikler incelendiğinde maksimum basıncın 1,6 ile 2,1 MPa aralığında olduğu görülmektedir. Standart supap profili için silindir içi basıncın supap bindirme sürecinde artış gösterdiği deneysel çalışmada da simülasyon 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 basınç artışı meydana gelmemektedir. Supap bindirmesinin kısa olması nedeniyle, düşük devirlerde daha az etki göstererek devir arttıkça bindirme esnasında silindir içi basınç artışı meydana gelmektedir.

Silindir içi karışım oluşumunun en önemli göstergelerinden biri de swirl oranıdır. Şekil 72’de 6 farklı supap durumu ve 8 farklı devir için swirl oranı değerleri görülmektedir. Analiz programında eksenlerin programın kendi altyapısındaki hesaplama yöntemine göre farklı tanımlanmasından kaynaklı olarak maksimum noktanın eksi değerinde olduğu görülmektedir. Bunun tamamıyla farklı eksen tanımlamasından kaynaklı olduğu ve maksimum değer pozitif olarak düşünülürse swirl oranı değerlerinin 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 EmSK durumları için erken açılma durumlarına göre swirl oranı değerinin çok fazla değişmediği, fakat maksimum olduğu noktanın daha erken olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Swirl oranının maksimum değerine, supap mekanizmasının değişiminin çok fazla etkisi olmadığı ve genel olarak manifold geometrisinin maksimum değere etkisi olduğu bilinmektedir. Swirl oranının maksimum olduğu noktayı ise EMS sistemi ile değişken supap zamanlaması uygulayarak istenen KMA değerinde maksimum olması sağlanabilir.

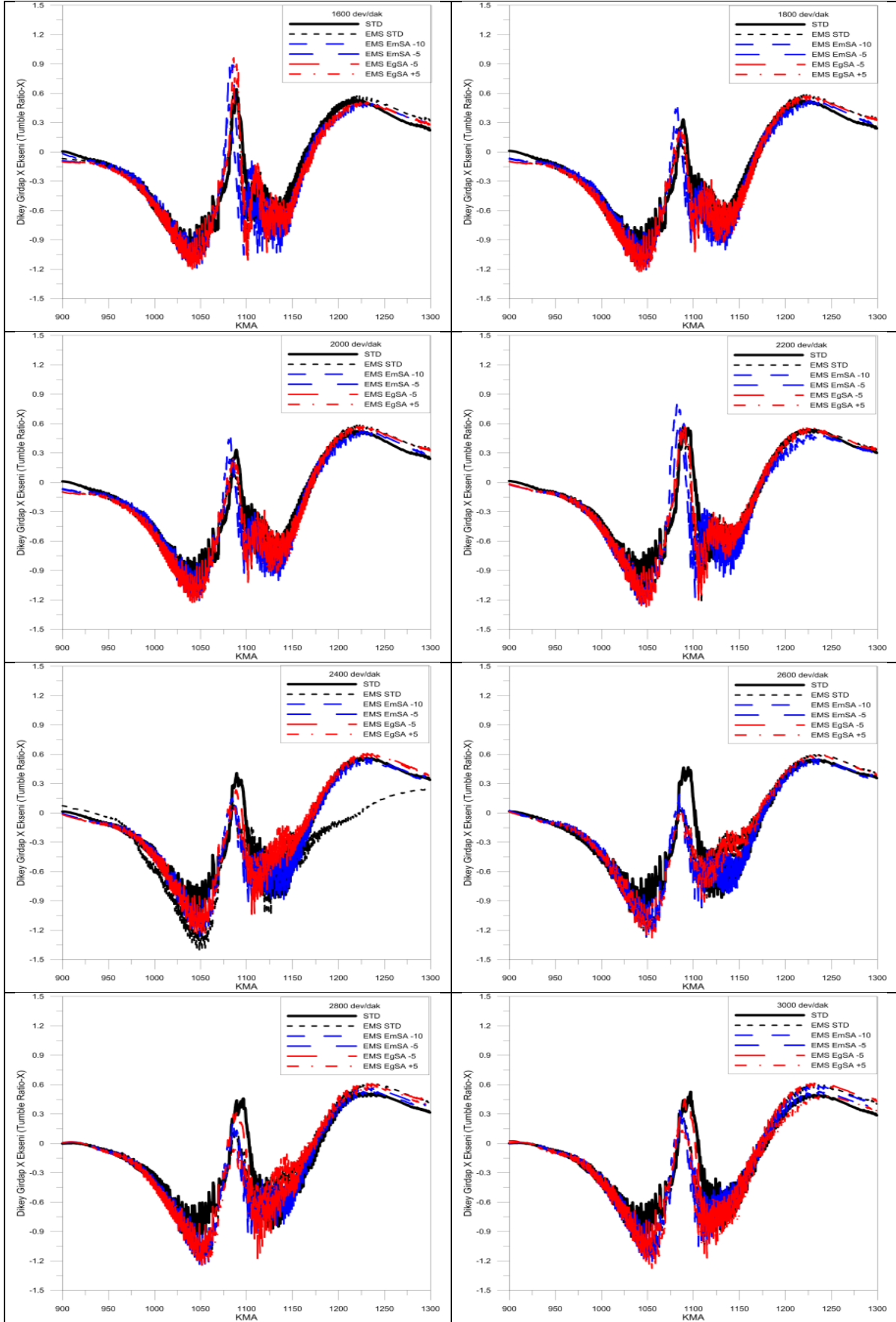
Silindir içi karışım oluşumunun en önemli göstergelerinden bir diğeri de dikey girdap (tumble x) oranıdır. Şekil 73’de de dikey girdap (tumble x) oranı değerleri görülmektedir. Tumble x oranı grafikleri incelendiğinde egzoz prosesi süresince ters etki olarak sürekli düştüğü, emme supabının açılması ile ani bir yükseliş sonrasında ise tekrar bir düşüş etkisi ile sonrasında tekrar artış eğilimi göstermektedir. Emme prosesi boyunca da tüm devirlerde maksimum 0,6 değerine ulaştığı görülmektedir. Emme supabının kapanmasına yakın yaklaşık 1220 KMA değerinden itibaren hafif bir iniş eğilimi 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 belirlenmiştir.



Şekil 71. Silindir içi basınç grafiği



Şekil 72. Yatay girdap (Swirl Ratio)



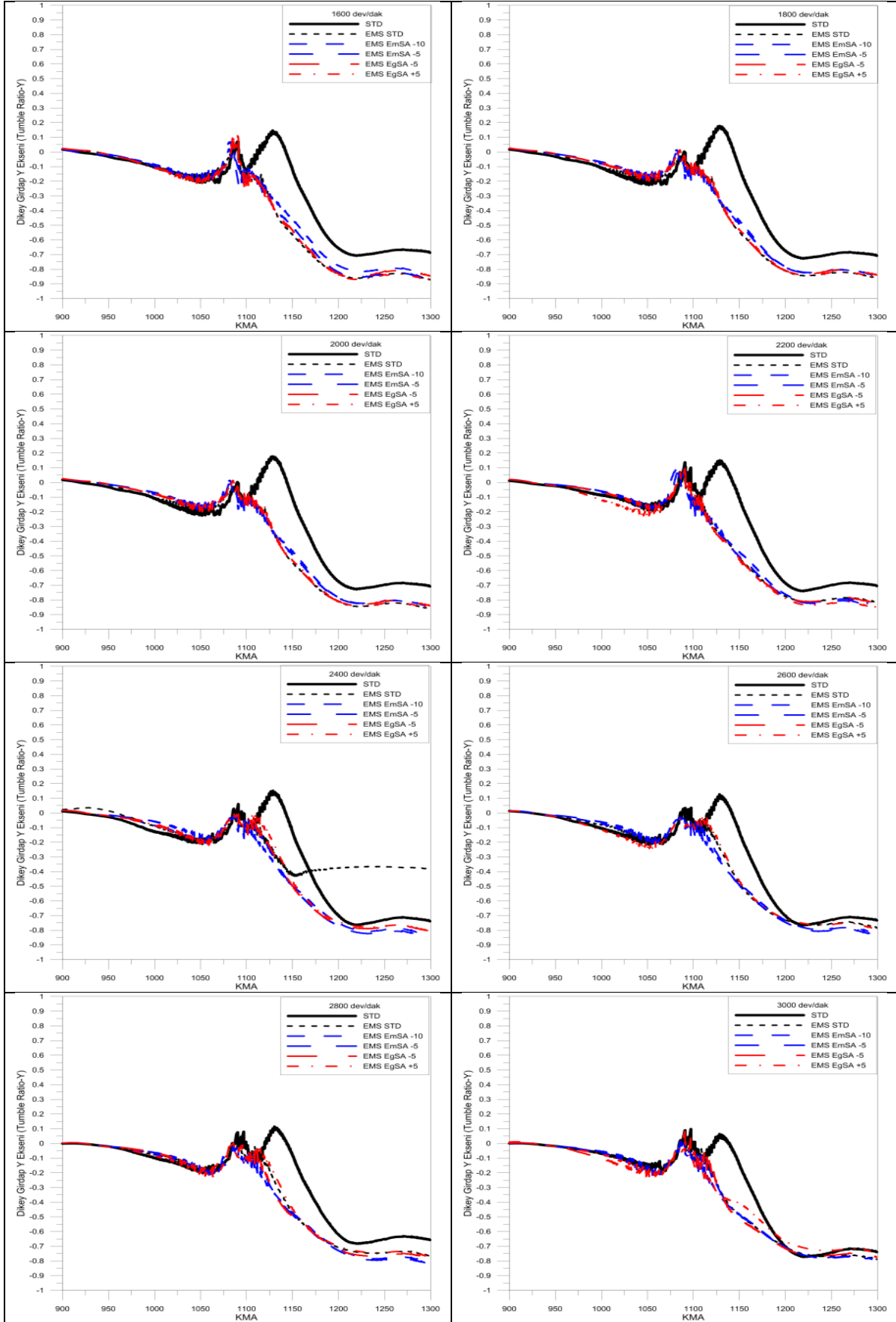
Şekil 73. Düey girdap (Tumble) x

Şekil 74'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 sonrasında ise bir düşüş etkisi ile sonrasında tekrar artış ve 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.

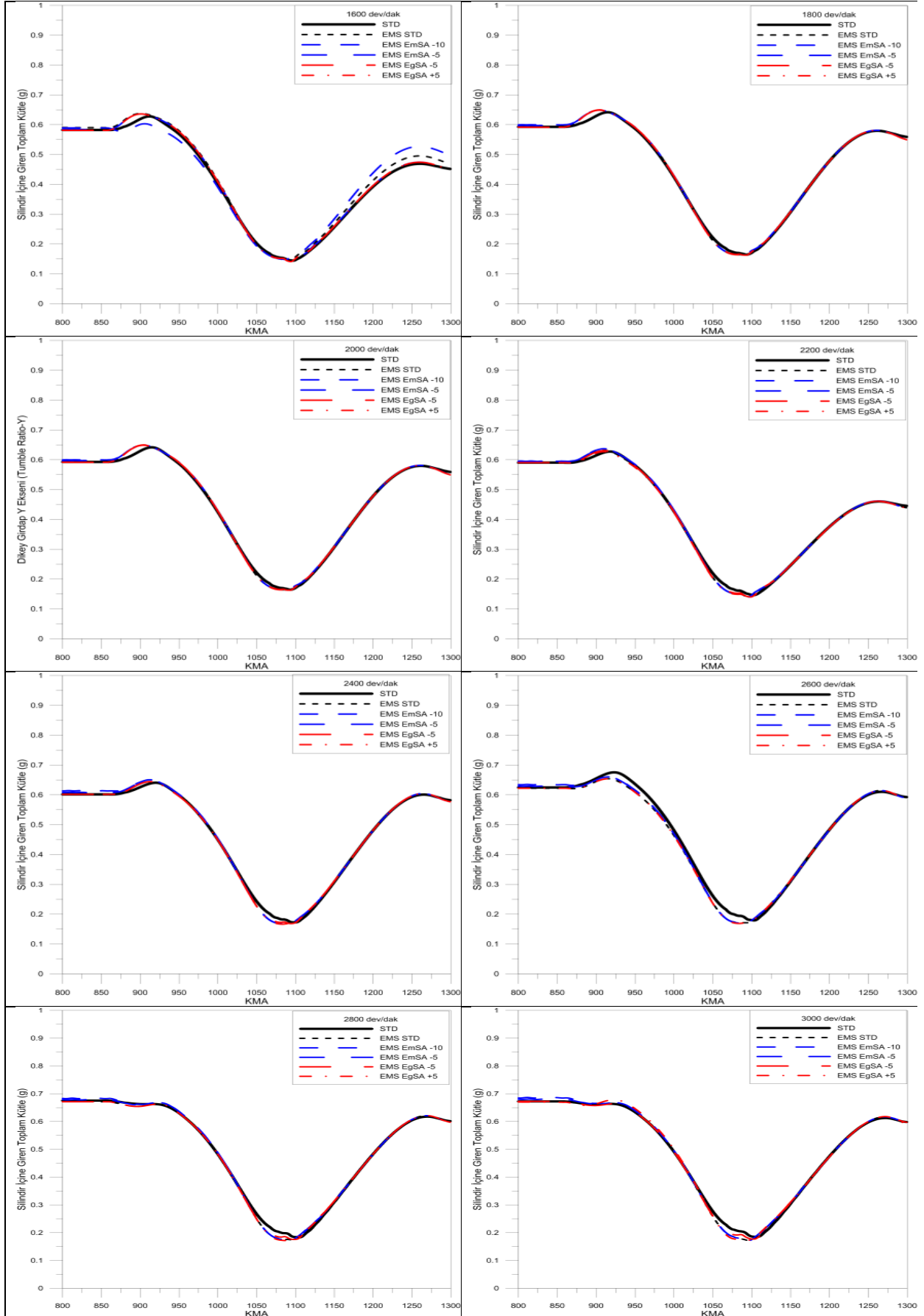
Şekil 75'de silindir içi hacmindeki hava kütesinin krank açısına bağlı değişimi görülmektedir. Grafiklere bakıldığında, düşük devirlerde egzoz supabının açılmasıyla bir miktar havanın geri tepme etkisi ile havanın ilk başta içeri girdiği ardından pistonun süpürme hareketinden dolayı tekrar azalmaya başladığı ve ÜÖN'ya kadar sürekli azaldığı ve bu esnada kapanması ve emme supabının açılması ile tekrar artmaya başladığı görülmektedir.

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 sonraki durumlarında silindir içindeki havanın azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise emme manifoldundaki akışta görüldüğü üzere ters hava akışlarının meydana geldiği pistonun yukarı yönlü hareketi ile silindir içerisindeki havanın emme manifoldu basıncını yenerek ters akış oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

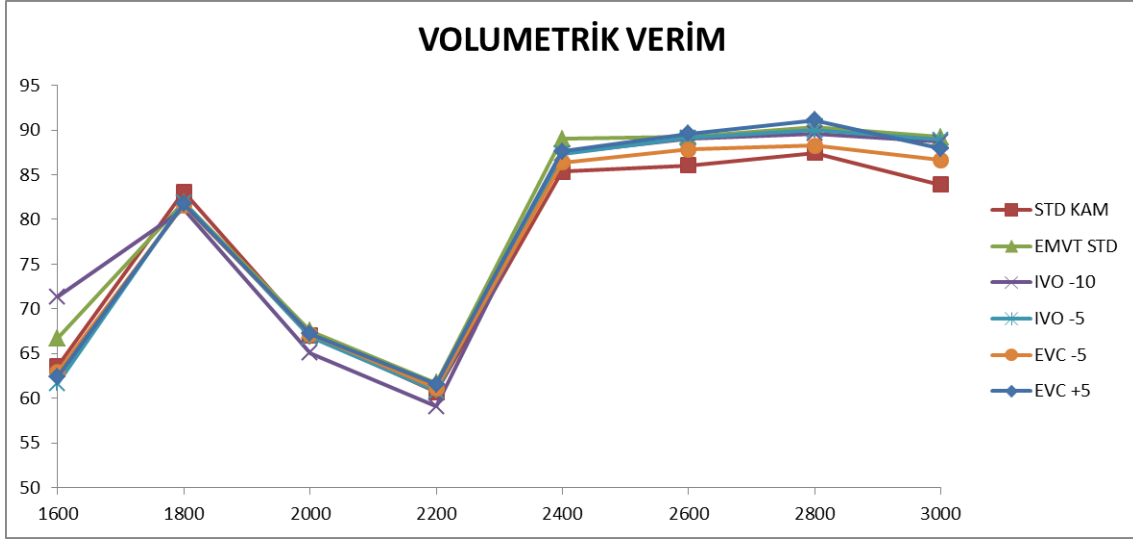
Şekil 76'de volümetrik veriminin motor hızı ile değişimi görülmektedir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarının genel olarak birbirine yakın olduğu görülmektedir. Kütleli hava debisi grafiğine benzer bir durum bu grafikte de görülmektedir 2600 ve 2800 dev/dk şartlarındaki volümetrik verim değerlerinin deneysel ve simülasyon farkının açıldığı anlaşılmaktadır. 1600 dev/dk civarında volümetrik verimin %62 civarında olduğu ve 1800 dev/dk'da %85 civarına yükselerek ardından düştüğü ve 2200 dev/dk'da 1600 dev/dk'dan daha düşük olduğu belirlenmiştir. 2400 dev/dk itibari ile yükselerek ortalama %90 civarında devam ettiği ve bu devirler arasında en iyi volümetrik verimin 2800 dev/dk'da elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 74. Dikeş girdap (Tumble) Y



Şekil 75. Silindir içinde kalan toplam kütle



Şekil 76. Volümetrik verim değişimi

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

EmSK 10 derece erkene alındığı durum değerlendirildiğinde; 2000 dev/dk'ya kadar volümetrik verime olumsuz etkisi olduğu ve 2200 dev/dk itibari ile volümetrik verimde standart kam mekanizmasına göre iyileşme sağladığı grafikten anlaşılmaktadır. EmSK 5 derece erkene alındığı durum değerlendirilirse; 1800 dev/dk'ya kadar volümetrik verime olumsuz etkisi olduğu ve 2000 dev/dk itibari ile volümetrik verimde standart kam mekanizmasına göre iyileşme sağladığı görülmektedir. EgSA 5 derece erkene alındığı duruma bakıldığında; 1800 dev/dk'ya kadar volümetrik verime olumsuz etkisi olduğu ve 2000 dev/dk itibari ile volümetrik verimde standart kam mekanizmasına göre iyileşme sağladığı anlaşılmaktadır. EgSA 5 derece geç kapandığı durumda 1800 dev/dk'ya kadar volümetrik verime olumsuz etkisi olduğu ve 2000 dev/dk itibari ile volümetrik verimde standart kam mekanizmasına göre iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır.

Genel olarak bakıldığında EMS sisteminin volümetrik verimi arttırdığı görülmüştür. Fakat bu standart supap zamanlamasındaki emme ve egzoz manifoldundaki basınç değerleri ile düşünülerek gerçekleştirilmiştir.

7. TARTIŞMA / SONUÇ

Bu proje kapsamında klasik kamlı sistem ve ESM ile gerçekleştirilen deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ESM'nin kullanılmasıyla volumetrik verimde artışların olduğu gözlemlenmiştir. ESM ile supap açılma ve kapanma zamanlarının kontrolü sağlanabilmiştir. Ayrıca, ESM supap hareketleri ile klasik kam profilleri karşılaştırılmıştır. Yapılan analiz çalışmalarında ise deneysel sonuçlarla analiz sonuçlarının doğrulanması sağlanmıştır. Literatürde ESM ile ilgili genellikle simülasyon, modelleme ve ESM'nin kontrolü üzerine çalışmalar bulunmaktadır. İçten yanmalı motorda ESM'nin volumetrik verime etkisinin incelemesine ait herhangi bir deneysel çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle projede elde edilen deneysel veriler literatürdeki simülasyon çalışmaları ile yorumlanmıştır.

Proje kapsamında yapılan deneyler ile birlikte ESM ile klasik supap mekanizması sonuçları karşılaştırılmıştır. ESM ile daha geniş bir supap profili sağlandığından silindir içerisine alınan hava miktarında artış sağlanmıştır. Bu nedenle, volumetrik verimde %3,5-%5,8 arasında artış elde edilmiştir. Emme supabı açılma zamanları ÜÖN'dan 5 ve 10 KMA önceye alınarak yapılan testlerde ise motorun orijinal zamanlamasına göre silindir içerisine alınan hava miktarlarında kısmen azalma meydana gelmiştir. Buna rağmen klasik supap mekanizmasına göre volumetrik verimde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca ESM ile emme supabının kapanması AÖN'dan 25 KMA sonraya alındığında volumetrik verimde klasik zamanlamaya (Emme supabının kapanması AÖNS 40 KMA) göre %1'lik bir artış gözlenmiştir ve silindir içi basınçta artış olduğu görülmüştür.

Deneysel çalışmalarda yaklaşık olarak 2000 dev/dk'dan sonra ESM emme supabı profilinin klasik supap profiline yaklaşması nedeniyle yapılan deneylerde volumetrik verimlerde değişimin olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum supap açılma süresinin yüksek devirlerde yeterli açılma hızını sağlayamadığından kaynaklanmaktadır. Ancak bu durum bobindeki elektromanyetik kuvvetin arttırılmasıyla düzeltilebilir. Bu da bobin sarım sayısının arttırılması veya akımın arttırılmasıyla sağlanabilir. Ancak akımın arttırılması bobinlerdeki sıcaklığı arttıracığından ayrıca bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulacaktır. Bu durumda en efektif çözüm bobin boyutlarının arttırılması olacaktır.

Simülasyon çalışmasında ise motorun CAD modelinin hassas bir şekilde elde edilmesi ile modelleme sonuçları ve deney sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle doğrulanması sayesinde sonsuz bir varyasyonda analizler

yapılabilecek ve deneysel çalışmaya göre hem maliyet hem de zaman açısından tasarruf sağlanabilecektir.

Simülasyon sonuçlarına göre EMS kullanılması durumunda standart supap zamanlamasına göre volumetrik verimde %2-5 arasında değişen bir iyileşme görülmektedir. Emme supabının açılmasının erkene alınması ve kapanma zamanının aynı olması durumunda ise verimin klasik kam mekanizmasına göre çok fazla değişmediği görülmüştür. Egzoz supabının kapanmasının 5 derece erkene ve 5 derece geçe alınması durumunun volümetrik verimi düşürdüğü fakat emme supabının erkene alınması kadar etkisi olmadığı tespit edilmiştir.

Silindir içi karışım oluşumunun en önemli göstergelerinden biri olan swirl oranının 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 sisteminde ise, EmSK (emme supabının kapanması) durumları için erken açılma zamanlarına göre swirl oranı değerinde çok az bir düşüş meydana geldiği ve maksimum olduğu noktanın daha erken olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan ise swirl oranının standart supap mekanizmasına göre çok fazla düşmediği ve emme supabının kapanmasına kadar swirl oranının standart kam mekanizmasına göre yüksek seyrettiği görülmüştür. Swirl oranının maksimum değerine supap mekanizmasının değişiminin çok fazla etkisi olmadığı ve genel olarak manifold geometrisinin maksimum değere etkisi olduğu bilinmektedir. Swirl oranının maksimum olduğu nokta ise EMS sistemi ile değişken supap zamanlaması uygulanarak kontrol edilebilir.

Simülasyon sonuçlarına göre tumble x ve y değerlerinin de erkene kaydığı fakat pek değişmediği görülmüştür. Tumble x ve EmSK durumları için, sadece supap bindirme esnasında meydana gelen ani bir artışın standart kam mekanizmasına göre daha düşük seviyelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. Tumble y için standart kam profiline göre meydana gelen ters bir artış EMS mekanizmalı durumlarda görülmemektedir.

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 getirebilmektedir. Bu durum standart kam mekanizması ve EMS mekanizmasında devrin artması ile çok daha fazla etkisini göstermektedir. Havanın ters



akış etkisinden dolayı volumetrik verim düşmektedir. Bu durumu önlemek için emme supabının alt ölü noktada kapatılması gerekmektedir.

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 eğilimi olduğu gözlemlenmiştir. Hava akış görselleri için alınan KMA değerlerinde, standart supap mekanizması ile EMS mekanizmalarının hava akış hızları arasında ciddi bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Fakat EMS sisteminde emme prosesi boyunca hava akış hızlarının standart kam mekanizmasına göre çok fazla düşmediği görülmüştür.

Simülasyon ve deneysel sonuçlarda da görüldüğü gibi, EMS mekanizması kullanılması ile volumetrik verimde artış meydana geldiği belirlenmiştir. 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 sağlanabilmektedir.

Gelecekte yapılması planlanan projelerde ise; bu proje kapsamında elektromanyetik supap mekanizması ile çıkılması mümkün olmayan devirler için de analizler yapıp, elektromanyetik supap mekanizmasının volumetrik verimde veya başka etkenlerde ne kadarlık bir artış sağlayacağı belirlenebilir. Özellikle, deneysel olarak elde edilmesi zor olan swirl, tumble gibi yanmayı etkileyecek parametreler üzerinde çalışmalar yapılması önem arz etmektedir.



8. KAYNAKLAR

- Ahmad T. and Theobeld M. A. "A Survey of Variable Valve Actuation Technology", *SAE Paper*, No: 891674 (1989).
- Alex, G. and Ilya K., "Modelling Positive Intake Valve Overlap Air Charge Response in Camless Engines", *In: Proceedings of ProAmerican Control Conference*, p.755–760, 2003.
- Asmus, T., (1982) Valve Events and Engine Operation, *SAE Technical Paper* 820749.
- Boccaletti, C., Felice, P. D., Santini, E., "Dynamic Analysis of Electromechanical Valve Actuators by Means of FEM Techniques", *Dipartimento di Ingegneria Elettrica Università Degli Studi di Roma "La Sapienza"- Via Eudossiana 18, 00184 Rome, Italy* (2004).
- Butzman S., Melbert J., Kock A., "Sensorless Control of Electromagnetic Actuators for Variable Valve Train", *SAE Paper No. 2000-01-1225* (2000).
- C. Schernus, F. van der Staay, H. Janssen, J. Neumeister, B. Vogt, L. Donce, I. Estlimbaum, E. Nicole, and C. Maerky, "Modeling of exhaust valve opening in a camless engine," *SAE World Congress*, Detroit, MI, Mar. 4–7, 2003, *SAE Paper* 2002-01-0376.
- Chang, S., Parlikar, T. A., Seeman, M. D., Perreault, D. J., Kassakian, J. G. And Keim, T. A., "A New Electromagnetic Valve Actuator", *IEEE Workshop on Power Electronics in Transportation*, pp. 109-118 (2002).
- Dresner T., Barkan, P. "A Review and Classification of Variable Valve Timing Mechanisms", *SAE Paper*, No: 890674 (1989).
- Giglio, V., Iorio, B., Police, G. and Gaeta, A. "Analysis of advantages and of problems of electromechanical valve actuators", *SAE* 2002-01-1105 (2002).
- Gould, L., Richeson, W., and Erickson, F., "Performance Evaluation of a Camless Engine Using Valve Actuation with Programmable Timing", *SAE Paper No.910450* (1991).
- Gray, C.A., "Review of Variable Engine Valve Timing", *SAE Paper*, No: 880386 (1988).
- Ham, Y.Y. and Park, P., "The Effects of Intake Valve Events on Engine Breathing Capability", *The Sixth International Pacific conference on Automotive Engineering*, Seoul, Korea, No.912470 (1991).
- Hara, S., Kumagai, K., Matsumoto, V. "Application of a Valve Lift and Timing Control System to an Automotive Engine", *SAE Paper*, No: 890681(1989).
- Heywood, J.B., "Internal combustion engine fundamentals", McGraw-Hill (1998).
- Hoffman, W., and Stefanopoulou, A., "Valve Position Tracking for Soft Land of Electromechanical Valvetrain", *3th IFAC Conference Advances in Automotive Control*, pp. 305-10 (2001a).

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

Hoffmann, W., Stefanopoulou, A., "Iterative Learning Control of Electromechanical Camless Valve Actuator", *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol 11, no.2, p. 174-184 (2003).

Kamış, Z., Yüksel, İ., "Elektromekanik supap mekanizmalarında tasarım parametrelerinin incelenmesi", *U.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9 (2), 45-58 (2004).

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

Mahrous, F., M. and others, "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*, 0954-4070, (2007).

Nitu, C., Gramescu, B. and Nitu, S., "Application of electromagnetic actuators to a variable distribution system for automobile engines", *Journal of Materials Processing Technology*, 161, 253-257 (2005).

Park, S.H., Lee, J., Yoo, J. and Kim, D., "A study on the design of electromagnetic valve actuator for VVT engine", *KSME International Journal*, 17, 357-369 (2003a).

Park, S.H., Lee, J., Yoo, J., Kim, D. ve Park, K., "Effects of design and operating parameters on the static and dynamic performance of an electromagnetic valve actuator", *Journal of Automobile Engineering*, 217, 193-201 (2003b).

Park, S.H., Lee, J., Yoo, J., Kim, D., Park, K. and Cho, Y., "A developing process of newly developed electromagnetic valve actuator - effect of design and operating parameters", *SAE*, 02FFL-93 (2001).

Peterson, K. S., Stefanopoulou, A. G., "Extremum Seeking Control for Soft Landing of An Electromechanical Valve Actuator", *Automatica*, Vol. 40, pp 1063, 7p (2004).

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

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

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

Pischinger, M., Salber, W., Staay, F.V.D., Baumgarten, H. ve Kemper, H. "Benefits of the electromechanical valve train in vehicle operation", *Variable Valve Actuation 2000. SAE*. 2000-01-1223. p. 43-53 (2000).

Roters, H.C. "Electromagnetic devices, J. Wiley & sons", inc (1941).



Safgönül, B., Soruşbay, E., Arslan, M., Ergenaman, M. "İçten Yanmalı Motorlar", *İTÜ., Makine Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı, Birsen Yayınevi İstanbul* (1999).

Schernus, C., "Modeling of Exhaust Valve Opening in a Camless Engine", *SAE SI 1990-2002*, 2002.

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

Stone, R., "Introduction to Internal Combustion Engine", *Mc Millan Publishing, USA*, 256 (1985).

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

Taylor, C.F., "The Internal Combustion Engine in Theory and Practice", *Mit press*, Volume 2, USA, 157-161 (1997).

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

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

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

Wang, Y., Stefanopoulou, A., Haghgoie, M., Kolmanovsky, I. and Hammoud, M. "Modeling of an electromechanical valve actuator for a camless engine", *Proceedings AVEC, 5 th Int. Symposium on Advanced Vehicle Control*, 93 (2000).



PROJE KAPSAMINDA ÇIKAN BAŞLICA YAYINLAR VE DOKTORA TEZİ

- 1) Demir U., Aygöl V., Coskun G, Soyhan H.S., Turkcan A., Alptekin E., ve Canakci M., “Modelling of the Effect of Electromechanic Valve Mechanism on Air Flow Parameters in a Spark Ignition Engine”, *International Advanced Technologies Symposium (IATS17)*, Vol: 1, p.: 3443-3452, Elazığ-TURKEY, October 19-21, 2017.
- 2) Demir U., Aygöl V., Coşkun G, Soyhan H.S., Türkcan A., Alptekin E., ve Çanakçı M., “Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Bir Motor İçin Hava Akış Parametrelerinin İncelenmesi”, *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2017)*, Vol: 1, p.: 1520-1529, Baku-AZERBAIJAN, September 29-30, 2017.
- 3) Demir U. “*Elektromekanik Supap Mekanizması ile Değişken Supap Zamanlamasının Hava Akış Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi*”, Sakarya Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2017 (YÖK Tez No: 484475).

Not: Doktora Tezi Özeti Sisteme yüklenemediği için Sonuç Raporunun sonuna eklenmiştir.



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**



TEŞEKKÜR

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

Mevcut çalışma sayesinde Türkiye'de şu an üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan yerli otomobil çalışmalarının yerli motoru konusunda, diğer motor üreticileri ile rakip olabilecek katkılar sunabileceği ve akademik açıdan bir örnek teşkil edeceği hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma 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 çalışmama çok büyük katkı sağlayan Sakarya Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

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



ÖZET

DOKTORA TEZİ

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

Üsâme DEMİR

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Hakan Serhad SOYHAN

2017, 117 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN

Prof. Dr. İmdat TAYMAZ

Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU

Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL

Doç. Dr. Cenk ÇELİK

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 silindirli 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 geçte 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.

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



ABSTRACT

Ph.D THESIS

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

Üsame DEMİR

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SAKARYA UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof.Dr. Hakan Serhad SOYHAN
2017, 117 Pages

Jury

Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN
Prof. Dr. İmdat TAYMAZ
Prof. Dr. Can HAŞİMOĞLU
Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL
Doç. Dr. Cenk ÇELİK

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.

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

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. MUSTAFA ÇANAKCI
Proje No:	114R058
Proje Başlığı:	Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Bir Motorda Elektromekanik Değişken Supap Zamanlamasının Hava Akış Parametrelerine Etkisinin Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	ALİ TÜRKCAN, ERTAN ALPTEKİN, HAKAN SERHAD SOYHAN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	KOCAELİ Ü. TEKNOLOJİ F. OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/10/2014 - 15/01/2018
Onaylanan Bütçe:	247600.0
Harcanan Bütçe:	194266.41
Öz:	<p>Bu proje kapsamında supap çalışma parametrelerinin, emme manifoldundaki akış üzerine etkisi deneysel ve sayısal yöntemlerle (CFD) incelenmiştir.</p> <p>Proje iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada (deneysel aşama), klasik kam miline sahip bir benzinli motor elektrik motoruna bağlanarak, yanmasız (motorize) bir ortamda, belli motor devirlerinde emme manifoldundaki kütleli hava debisinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Daha sonra, aynı motor, elektromekanik supap kontrollü motora çevrilerek, kamsız motor sistemi ile testler yapılmıştır. Elektromekanik supap sistemi, bir mikro kontrolör devresi tarafından kontrol edilerek, klasik motor için tanımlanan sabit devir şartlarında, emme supap zamanı ve supap kalkış miktarı değişiminin kütleli hava debisi üzerine etkisi incelenmiştir. Emme supap zamanlaması ve supap kalkış miktarı değişimi için elde edilen kütleli hava debisi klasik motor verileri ile karşılaştırılmıştır. Projenin ikinci aşaması ise, atmosferik şartlar, supap zamanlaması ve kalkış miktarı, motor tasarımı kullanarak modelleme çalışmasının yapılmasıdır. Bu kapsamda, klasik kamli supap sistemi ve (kamsız) Elektromekanik supap sistemi ile deneysel olarak valf zamanlaması denemeleri yapılmış ve bilgisayar destekli akışkan dinamiği (CFD) tabanlı bir bilgisayar programında da analizleri gerçekleştirilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Kamsız Motor, Elektromekanik Değişken Supap Zamanlaması, Volümetrik Verim, CFD Analiz
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Demir U., Aygül V., Coşkun G, Soyhan H.S., Türkcan A., Alptekin E., and Çanakcı M., Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Bir Motor İçin Hava Akış Parametrelerinin İncelenmesi (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 2- Demir U., Aygul V., Coskun G, Soyhan H.S., Turkcan A., Alptekin E., and Canakci M., Modelling of the Effect of Electromechanic Valve Mechanism on Air Flow Parameters in a Spark Ignition Engine (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),