

TEK SİLİNDİRLİ BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORUN SİLİNDİR İÇİ HAVA AKIŞ PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

^{1,*}Usame Demir, ²Volkan Aygül, ¹Gökhan Coşkun, ^{1,3}Hakan S. Soyhan, ²Ali Türkcan, ²Ertan Alptekin, ²Mustafa Çanakcı

¹ Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Turkey
²Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, İzmit, Turkey
³Team-SAN Ltd. Şti., Sakarya Üniversitesi Teknokent, Sakarya, Turkey

Özet

Bu çalışmada buji ateşlemeli tek silindri bir motorun hava akış parametreleri üç boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı ile incelenmiştir. Deneysel çalışmada farklı devirlerde silindir içi basınç, emme ve egzoz havası sıcaklıkları ve emme manifoldundan silindire giren havanın debisi klasik kam mekanizması ile ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler analiz başlangıç koşulları olarak kullanılmıştır. Analiz çalışmaları için ANSYS yazılımının alt modülü olan ve içten yanmalı motor simülasyonu yapabilen Forte yazılımı kullanılarak silindir içi akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Soğuk akış simülasyonu için emme ve egzoz manifoldları dahil olan tam model kullanılmıştır. Farklı devirlerde deneysel olarak ölçülen değerler ile analiz volümetrik verim hesabı gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışması sonucunda elde edilen veriler ile volümetrik verim hesaplanarak deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Silindir İçi Akış Modellenmesi, Volümetrik Verim,

Abstract

In this study, air flow parameters of a single-cylinder spark ignition engine were investigated by three-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) software. In the experimental study, in-cylinder pressure, intake and exhaust air temperatures and air mass flow from the intake manifold were measured by the conventional cam mechanism at different RPM. These measured values were used as initial conditions for analysis. Cold flow simulations were performed using for analysis studies Forte software, which is a sub-module of ANSYS software and can simulate internal combustion engine. The full model, including suction and exhaust manifolds, is used for cold flow simulation. Volumetric efficiency calculations were performed with the values measured experimentally at different RPM. Volumetric efficiency was calculated by the data obtained from the simulation study and compared with the experimental study. Experimental results were found to be consistent with the analyses results.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Cold Flow Modeling, Volumetric Efficiency,

1. Giriş

Günümüzde artan araç sayısı ve buna bağlı artan yakıt talebi ile emisyonlara getirilen sınırlamalardan dolayı otomobil endüstrisinin her geçen gün içten yanmalı motorlar konusunda yanma verimliliğini arttırma ve emisyonları azaltma yönündeki çalışmalar her geçen gün artmaktadır.

Günümüzde petrolden elde edilen sıvı yakıtların sınırlı rezervlerine rağmen, dünyada otomotiv sektörü hızla gelişmektedir. Bu gelişmeye paralel olarak oto yakıtlarının tükenmesi ve çevre kirliliği gibi çözülmesi gereken sorunlar ortaya çıkmaktadır. Yakıt tüketiminin ve çevre kirliliğinin azaltılması silindirde gerçekleşen yanmanın verimli bir şekilde oluşumuna bağlıdır. Bu nedenle silindir içi yanma verimini arttırmak adına yapılan birçok araştırma ve geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. Yapılan araştırmalar içinde düşük sıcaklıklı yanma olarak bilinen motor emisyonlarının büyük ölçüde azalmasının ve hava yakıt karışımının silindir içinde homojen dağılımı ile verimli bir yanmanın sağlandığı içten yanmalı motor konseptleri yoğun ilgi görmektedir. Özellikle büyük otomobil üreticileri yakın zamanda gerçek anlamda düşük sıcaklıklı yanmanın gerçekleştirildiği motorları piyasaya sürmek için konu hakkında yapılan çalışmalara büyük destekler vermektedirler. Bu gibi motorlarda yanmanın kontrolünün sağlanabilmesi için farklı stratejiler geliştirilmektedir. Bunlardan en önemlisi olarak görülen ve en çok üzerinde çalışılan konulardan biri olan emme prosesinin iyileştirilmesi konusudur. Bu konuda birçok çalışmalar yapılmıştır.

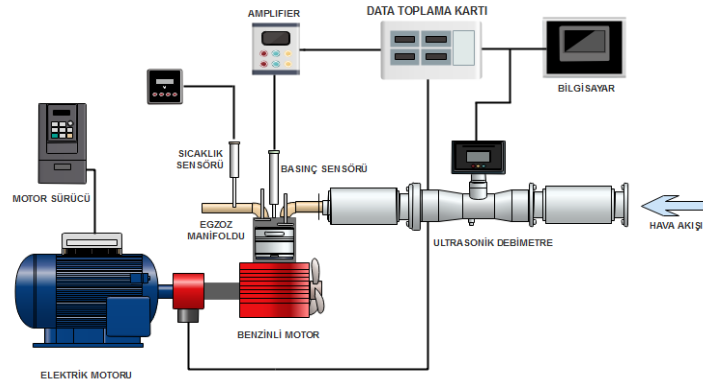
Bailly ve ark.; Dört supaplı benzinli bir araştırma motoru için lazer doppler velosimetre cihazı kullanarak deneysel olarak hız, yatay girdap (swirl), dikey girdap (tumble) gibi değerleri ölçerek bunun bilgisayar ortamında simülasyon ile desteklenmesi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı geliştirmişler ve bu HAD kodunu kullanarak soğuk akış simülasyonu yani yanmasız hava akış simülasyonu gerçekleştirmiş ve deneysel sonuçlarla uyumluluğunun iyi derecede olduğunu ortaya koymuşlardır [1]. Johan ve ark.; Tek silindirli bir motor için soğuk akış modeli geliştirerek bu geliştirdiği modelin emme, egzoz ve sıkıştırma zamanlarında hareketli ağ yapısı ile düzgün bir şekilde çalışıp çalışmadığını incelemişlerdir [2]. Schernus ve ark.; tek silindirli benzinli bir motor için elektromekanik supap mekanizması kullanılması durumunu üç farklı açıdan incelemişlerdir. İlk olarak Matlab/Simulink yazılımıyla elektromekanik sistemde supabın açılması için yayı sıkıştırması gereken kuvvet ve bobinlerde ki gerekli enerjiyi belirlemişlerdir. İkinci olarak emme ve egzoz manifoldlarındaki akışın geri tepme basıncını düşürmek için manifold geometrisi optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir ve son aşama olarak gt-power yazılımını kullanarak geri tepme basınç kayıpları ve elektromanyetik supabın açık kalma süresini değiştirerek supapların açılması için gerekli kuvvetleri belirlemişlerdir [3]. Gibson ve Kolmanovsky; kamsız motorların supaplarını bağımsız olarak kontrol ederek geniş bir motor devri aralığında tork ve yakıt verimliliğini en üst düzeye çıkarabilir. 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[4]. Laramee ve ark.; içten yanmalı

motorlar için iki önemli hava akış parametresi olan yatay girdap (swirl) ve dikey girdap (tumble) etkisini hareketsiz durum için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile bu parametrelerin görüntüleme tekniği konusunda incele yapmışlardır. 2, 2.5 ve 3 boyutlu akışın görselleştirilmesi hususunda yapılan çalışmalar neticesinde akış çizgileri veya akış konturlarının gösterimi konusunda boyut görsellik olarak ilişkinin fazla olduğu ve akışın görselleştirilmesi konusunda önemli olduğunu ortaya koymuşlardır [5]. Sushma ve Jagadeesha yapmış oldukları çalışmada Ansys Fluent yazılımını kullanarak direk enjeksiyonlu dizel bir motorun silindir içi akış modellemesini üç farklı piston üstü geometrisi ile çalışmışlardır. Simülasyon sonuçlarında piston üstü geometrisinin Meksika şapkası diye tabir edilen şekilde olması durumunda içeride oluşan türbülansın ve volümetrik verimin en ideal şekilde oluştuğunu ortaya koymuşlardır [6].

Jia ve ark., detaylı kimyasal kinetik mekanizmayla birlikte hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan KIVA-3V simülasyon yazılımını kullanarak bir tam çevrim analizini, enjeksiyon başlangıç zamanının ve emme valfi kapanma zamanlamasının kısmi ön karışım dolgululu dizel motorların emisyon ve performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. HC, CO, NO_x emisyonlarını azaltmak için enjeksiyon başlangıcının belirli bir aralıkta kalması gerektiğini ve emme supabının kapanmasının gecikmesiyle enjeksiyon başlangıç zamanlamasının çalışma aralığı, temiz yanma için daha geniş olur. Emme supapı kapanma zamanlaması, yakıt ekonomisini geliştirmek amacıyla farklı enjeksiyon başlangıç zamanlarında, yanma verimi ve ateşleme zamanlamasını dikkate alarak optimize edilmelidir. Motor vuruşundan kaçınmak amacıyla üst ölü nokta (ÜÖN)'dan 20° KMA sonraki enjeksiyon başlama zamanlaması ve erken emme supapı kapanma zamanlaması sürdürülmüştür [7]

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılan deney sisteminin bileşenleri; dört zamanlı-tek silindirli benzinli motor, elektrik motoru, elektrik motoru sürücüsü, elektronik kontrol kartı, bobin sürücü kartı, güç kaynağı, enkoder, silindir basınç ve ÜÖN sensöründen oluşmaktadır. 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 1. Deney düzeneğinin genel görünümü

Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1’de verilmiştir. Ultrasonik debimetrenin motorun emme manifolduna uygun şekilde montajı yapılmış ve silindir içine alınan hava miktarı belirli devirlerde ölçülmüştür. 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.

Tablo 1. Test motorunun teknik özellikleri

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

Deneyisel çalışmada Honda GX 390 marka dört zamanlı-tek silindirli bir benzinli motor kullanılmıştır. Test motoruna ait teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Emme ve egzoz manifoldu sıcaklıklarının ölçülmesi için 0.1 derece hassasiyetli iki termocupl ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Basınç değerleri ise silindir içi basınç ölçüm cihazından alınan tam bir çevrim basınç verisindeki emme ve egzoz zamanında en düşük basınç değerleridir. Deneyler esnasında emme ve egzoz manifoldu sıcaklık ve basınç değerleri ölçülmüş ve analizler esnasında kullanılmıştır

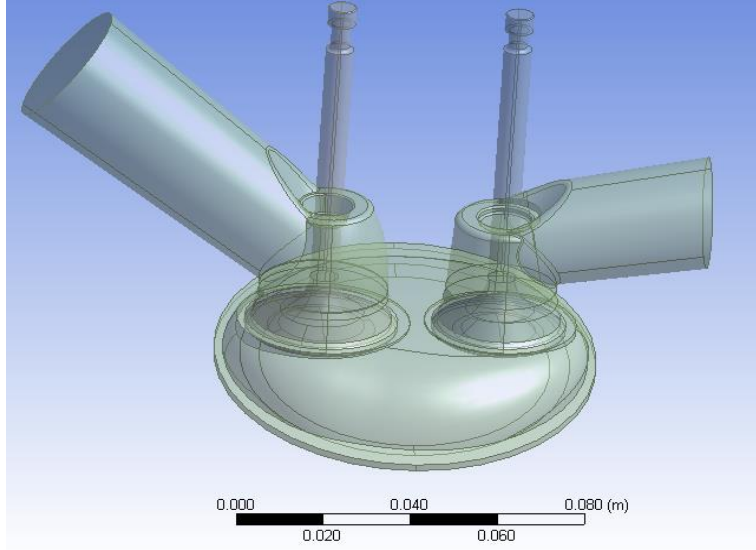
2.1. Silindir İçi Akış Analizi Çalışması

Silindir içi akış analizi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olan Ansys IC Engine Forte[8] modülü kullanılmıştır. HAD ile yanma reaksiyonları olmadan silindir içi akış analizinin yapılması deneysel olarak yapılması maliyetli olan geometri optimizasyonu, swirl, tumble gibi yanma verimliliğini artırma etkisi olan parametrelerin iyileştirilmesinin bilgisayar ortamında yapılmasını sağlamaktadır.

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 çok hassas ve detaylı bilgi gerektiren parametrelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Modelleme çalışmasında kullanılacak bu parametreler deneysel olarak kurulumu yapılacak motor düzeneğinden elde edilecektir. Ansys-Forte ticari yazılımı kullanılarak yapılacak olan HAD analizlerinde portlar ve silindir içi ortam arasındaki hava akışı simüle edilecektir. Yapılması planlanan HAD analizleri için motorun üst bloğundaki emme manifoldu, egzoz manifoldu ve supapların da dahil olduğu silindir iç hacminin modelleneyeceği bir CAD modeli oluşturulması gerekmektedir.

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 CAD model elde edilmiştir. Hava akışının gerçekleştiği manifold ve silindir içi alanların CAD modeli Şekil 2’de görülmektedir.



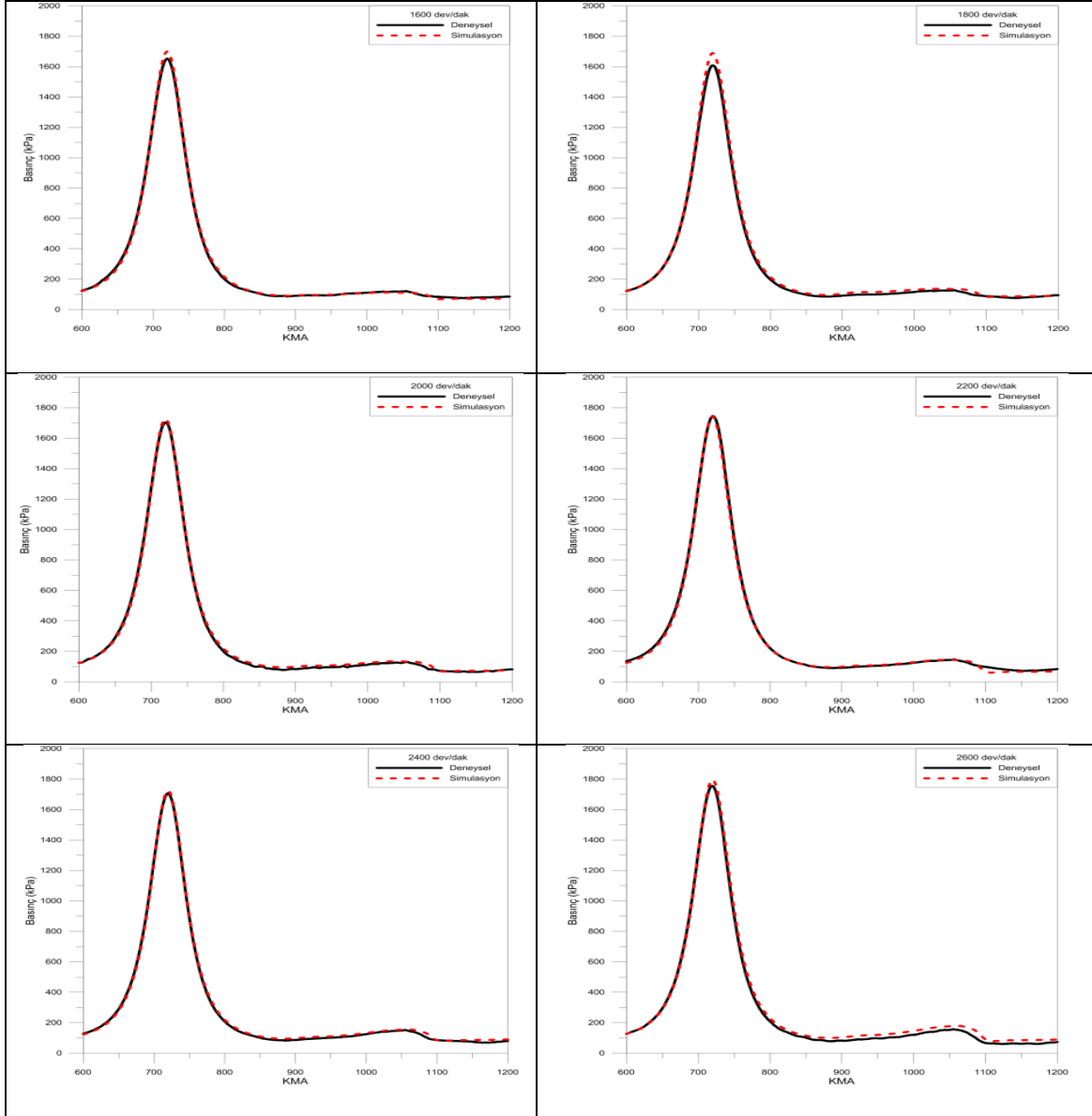
Şekil 2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İçin Gerekli Model

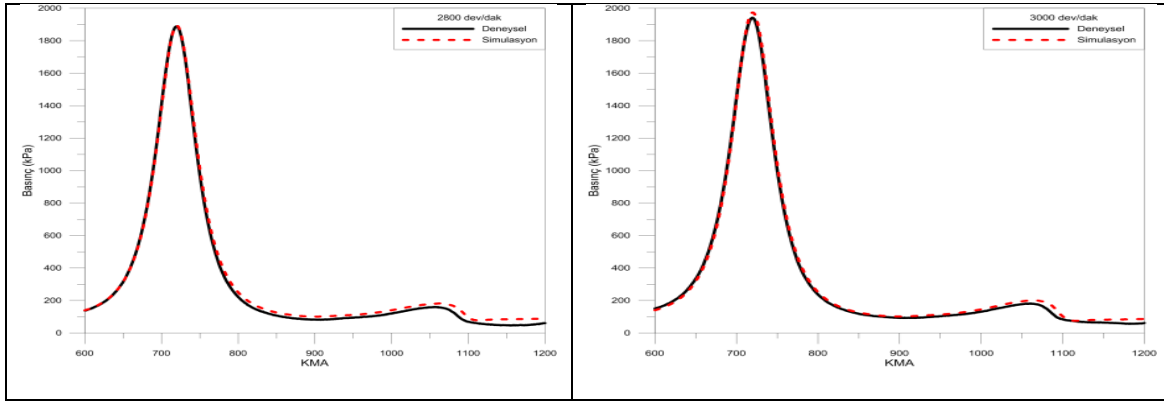
Ansysis 17.2 İçten Yanmalı (İY) Motor yazılımı yardımı ile CFD analizi yapılacak olan motor geometrisi üzerinde dinamik ağ yapısının sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Silindirin ve supapların aşağı yukarı hareketi için gerekli olan oldukça karmaşık ve zahmetli 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. Analizler tam 1 döngü yani 720 krank açısı için gerçekleştirilmiştir. Bu analizler için gerekli olan krank açısına bağlı basınç ölçüm değerleri deneysel ortamda elde edilmiş ve analizlerin doğrulanması için kullanılmıştır. Aynı zamanda çalışmanın en önemli göstergesi olacak olan hava debisi ölçümleri, emme manifoldunda standart kam profili için gerçekleştirilmiş aynı durum analiz ortamında da incelenmiştir.

3. Analiz Sonuçları

Simülasyonların zamana bağlı olması ve dinamik ağ yapısı nedeniyle çok fazla cpu-time gerektiren bir çalışma olmaktadır. Dinamik mesh nedeniyle bilgisayar kapasitelerine göre farklılık göstermekle birlikte yaklaşık bir analiz ortalama 15 günlük cpu-time gerektirmektedir. Ansys Forte yazılımında ön parametreler girilerek ardından supap profili okutulmaktadır. Emme supabı üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) açılma avansı bulunmamakta yani piston tam üst noktada iken açılmaya başlamakta ve alt ölü noktadan 40 krank mili açısı(KMA) sonra (AÖNS)

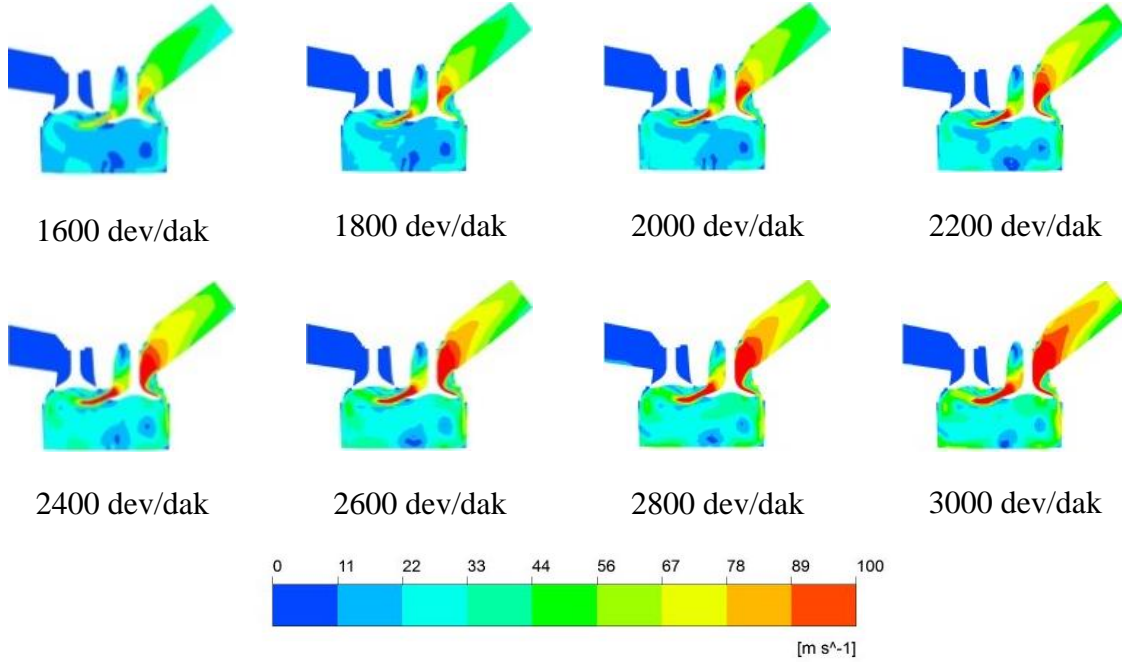
kapamaktadır. Egzoz supabı ise alt ölü noktadan 45 KMA önce açılmakta (AÖNÖ) ve üst ölü noktadan 5 KMA sonra kapamaktadır. Bu zamanlamaya göre elektromekanik supap profili Matlab yazılımı yardımı ile oluşturulmuştur.





Şekil 3. Silindir İçi Basınç Grafikleri

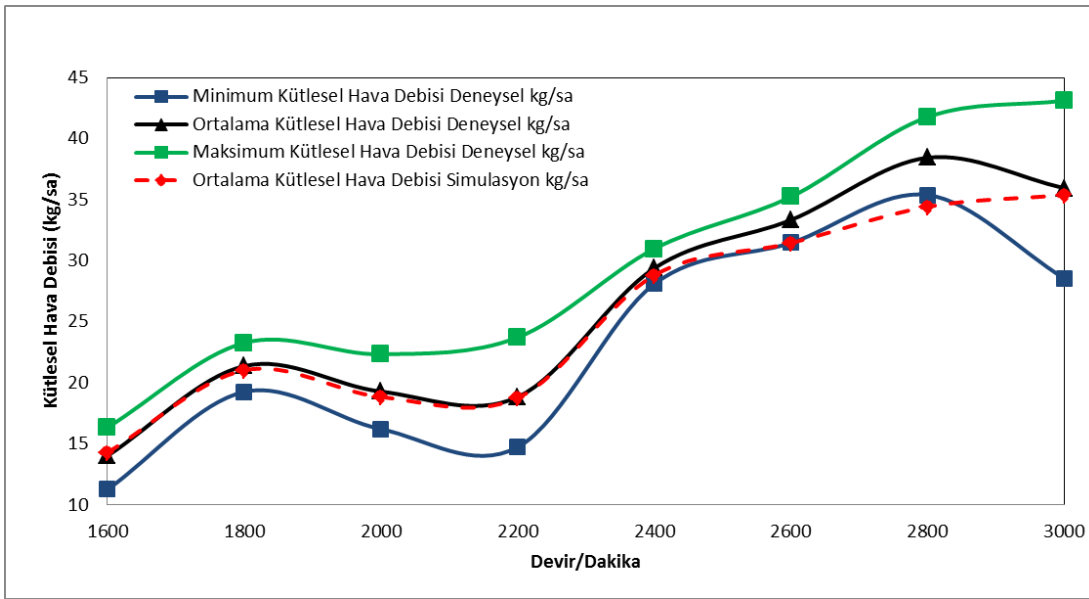
Şekil 3’de 1600-3000 dev/dak aralığında 8 farklı devir için krank açısına bağlı silindir içi basınç grafiği görülmektedir. Grafikler incelendiğinde emme ve egzoz prosesleri yapılırken ki basınç grafikleri ve aynı zamanda sıkıştırma esnasında da basınç değerlerinin deneysel ve simülasyon sonuçlarının birbiri ile örtüştüğü görülmektedir. Bunun yanında silindir içi basınç değerleri incelendiğinde hem deneysel hem de simülasyonda supap bindirme sürecindeki basınç artışının etkisi görülmektedir. Bunun nedeni ise Egzoz supabının kapanmasının son kısımlarında piston üst ölü noktaya yaklaşmakta ve akış alanı daraldığı için içerideki havanın dışarıya çıkamaması ve sonuç olarak devrin artması ile birlikte burada oluşan basıncın artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4. 1160 KMA Silindir içi ve Manifold hız dağılımı

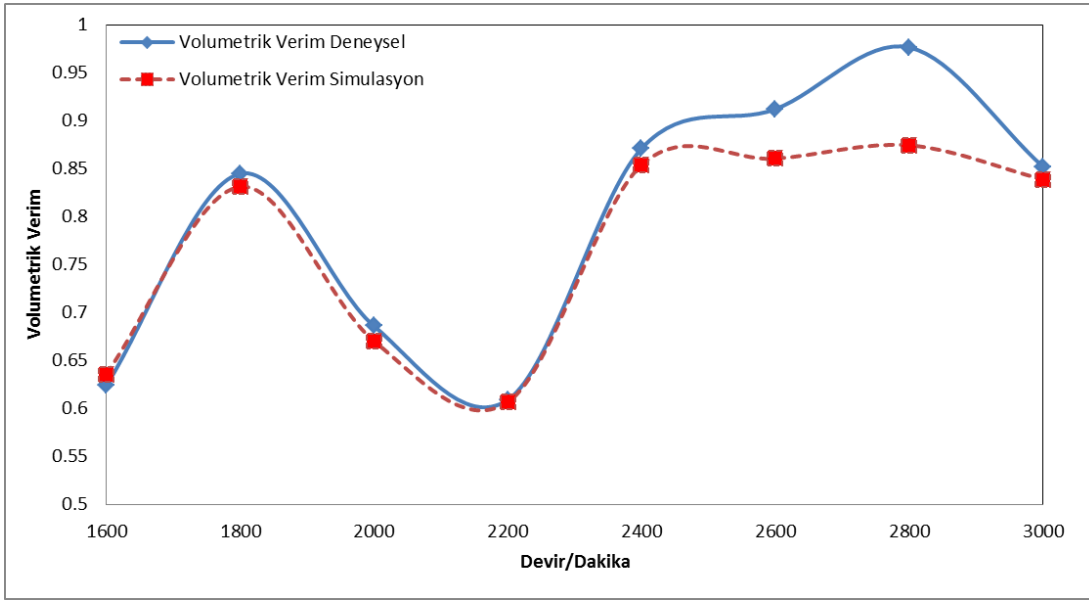
Şekil 4’de hava akış hız dağılımının 1160 KMA anındaki görüntüleri görülmektedir. Emme supabının 1080 KMA’da açılmaya başladığı ve bu anda tamamen kapalı olduğu, 1190 KMA’da ise standart supap profiline göre tamamıyla açıldığı göz önünde bulundurularak. 1160 KMA

esnasında ki hava akış hız dağılımlarının manifold ve silindir içinde kapsayacak şekilde alınan kesit görüntüsü ile şekilde verilmiştir. Şekilde hava hızının bölgesel olarak dağılımını anlamak adına renk skalası ile verilmiştir. Bu renk skalası tüm durumlar için 0-100 m/s aralığında alınarak görseller eş olacak şekilde düzenlenmiştir. Genel olarak renk skalasına bakılacak olursa 1160 KMA esnasında egzoz supabının kapalı olması nedeniyle egzoz manifoldu kısmında hava hareketlerinin olmadığı görülmektedir. Genel olarak bakıldığında 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 hızlarına bakıldığında ise düşük devirlerde 10-20 m/s aralığında iken devir yükseldikçe bu aralığın 20-40 aralığına kadar yükseldiği şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 5. Kütlesel Hava Debisinin devir ile değişimi

Motorun emme havası debisi ölçümleri şekil 5’de görülmektedir. Grafik incelendiğinde genel trend olarak devir ile artış meydana geldiği görülmektedir. Deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçlarında da görüldüğü üzere 1800 dev/dak’da kütlesel hava debisinin yaklaşık 21 kg/sa civarına yükseldiği ve sonrasında düşerek 2200 dev/dak kütlesel hava debisinin yaklaşık 18 kg/sa olduğu ardından yükselerek sürekli bir artış gösterdiği ve maksimum debinin 2800 dev/dak’da yaklaşık olarak 38 kg/sa olduğu ve 3000 dev/dak’da tekrar düştüğü grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Volumetrik verimin devir ile değişim grafiği

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

4. Sonuç ve Değerlendirme

Deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilen bu çalışmada 8 farklı devir için hava akış debileri ve silindir içi basınç değerleri deneysel olarak ölçülmüş ve bu deneysel çalışma ile simülasyon çalışmasının doğrulaması yapılmıştır. 3 boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılarak farklı devirlerde analizler yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen bulgular göz önüne alınırsa düşük devirlerde volümetrik verimin iyi olmadığı belli bir devirden sonrada volümetrik verimin düz bir eğri verdiği gözlemlenmiştir.

Silindir içi hava akışının türbülanslı olması ve içerideki hava hareketlerinin ne kadar önemli olduğu bu çalışmada görülmektedir. Deneysel çalışmaların maliyet ve zaman gerektirdiğinden dolayı HAD simülasyon yazılımları çok büyük avantaj sağlamaktadır. Düşük devirlerde motorun volümetrik veriminin artırılması veya silindir içi hava akışının iyileştirilmesi çalışmaları bu sayede yapılabilmektedir.

Referanslar

- [1] O. Bailly, C. Buchou, A. Floch, L. “Sainsaulieu, Simulation of the intake and compression strokes of a motored 4-valve SI engine with a finite element code”, *Oil Gas Sci Technol Rev IFP*, 54 (No. 2) (1999), pp. 161-168.
- [2] Z. Johan, A.C.M. Moraes, J.C. Buell, R.M. Ferencz, In-cylinder cold flow simulation using a finite element Eng. 190 (2001) 3069–3080.
- [3] Schernus, C., Van der Staay, F., Janssen, H. and Neumeister, H. (2002). Modeling of exhaust valve opening in a camless engine. SAE Paper No. 2002-01-0376..
- [4] Gibson, A., & Kolmonovsky, I., (2003). Modeling positive intake valve overlap air charge response in camless engines. *Proceedings of the American Control Conference* (pp. 755–760).
- [5] R. S. Laramée, C. Garth, H. Doleisch, J. Schneider, H. Hauser, and H. Hagen. Visual Analysis and Exploration of Fluid Flow in a Cooling Jacket. In *Proceedings IEEE Visualization 2005*, pages 623-630.
- [6] H.Sushma and Jagadeesha.K.B, “CFD Modeling of the in-Cylinder Flow in Direct-Injection Diesel Engines”, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3.12 (2013), pp.1–7.
- [7] M. Jia, M.Z. Xie, T.Y. Wang, Z.J. “Peng, The effect of injection timing and intake valve close timing on performance and emissions of diesel PCCI engine with a full engine cycle CFD simulation”, *Appl Energy*, 88 (2011), pp. 2967-2975.
- [8] ANSYS® Academic Research, Release 17.2.