
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 09.05.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 20.10.2016	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.283480	

Sıfır ve üç boyutlu yanma simülasyonu yazılımlarının HCCI motorunun yüksek hava fazlalık oranı için modellenmesindeki performanslarının incelenmesi

Gökhan Coşkun¹, Üsâme Demir^{1*}

ÖZ

Bu çalışmada, Birincil Referans Yakıtı (BRY) (% 85 izo-oktan ve % 15 n-heptan) ile çalıştırılmış homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motorun simülasyonu için kullanılan sıfır boyutlu (0-B) ve üç boyutlu (3-B) yazılımların performansı incelenmiştir. 0-B yazılım olarak Stokastik Reactor Model (SRM) tekniği ile motor yanması analizleri yapabilen SRM Suit kullanılmıştır. 3-B motor yanması simülasyonları için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları yapabilen Ansys-Fluent programı kullanılmıştır. Her iki ticari yazılım ile HCCI motor için yapılan simülasyonlar silindir içi basınç değişimi, ısı yayılım oranı ve emisyonlar açısından incelenmiştir. BRY yakıtının yanma analizinin yapılabilmesi için Tsurushima tarafından geliştirilen 33 bileşen ve 38 reaksiyon içeren kimyasal kinetik mekanizma kullanılmıştır. Analiz sonuçları ile deneysel basınç, ısı yayılım oranı ve emisyon değerleri kıyaslanmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında her iki yazılımın birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: 0 ve 3 Boyutlu Analiz Yazılımı, Kimyasal Kinetik Mekanizma, İçten yanmalı motor

Investigation the performance of 0-D and 3-d combustion simulation softwares for modelling HCCI engine with high air excess ratios

ABSTRACT

In this study, performance of zero and three dimensional simulations codes that used for simulate a homogenous charge compression ignition (HCCI) engine fueled with Primary Reference Fuel PRF (85% iso-octane and 15% n-heptane) were investigated. 0-D code, called as SRM Suite (Stochastic Reactor Model) which can simulate engine combustion by using stochastic reactor model technique were used. Ansys-Fluent which can simulate computational fluid dynamics (CFD) was used for 3-D engine combustion simulations. Simulations were evaluated for both commercial codes in terms of combustion, heat transfer and emissions in a HCCI engine. Chemical kinetic mechanisms which developed by Tsurushima including 33 species and 38 reactions for surrogate PRF fuel were used for combustion simulations. Analysis showed that both codes have advantages over each other.

Keywords: 0-D and 3-D Simulation Software, Chemical Kinetic Mechanism, Internal Combustion Engine

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya – gcoskun@sakarya.edu.tr, udemir@sakarya.edu.tr,

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde artan araç sayısı ve emisyonlara getirilen kısıtlama nedeniyle içten yanmalı motorların daha verimli hale getirilmesi için yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmaların deneysel olarak yapılması yüksek maliyetlere ve deney setinin kurulum aşamasında büyük bir zaman kaybına neden olmaktadır. Bu sebeple içten yanmalı motorların simülasyonu üzerine yeni yazılımlar geliştirilmekte ve var olan yazılımların daha gerçekçi yanma modeli oluşturabilmek için sürekli güncelleme çalışmaları yapılmaktadır. Yanma fenomeni birkaç farklı şekilde modellenilebilmektedir fakat bu yöntemlerden en güvenilir, çok daha gerçekçi sonuç veren ve kimyasal olayları detaylı bir şekilde çözülmesini sağlayan metotların başında gelen kimyasal kinetik mekanizmaların doğrudan kullanımı için literatürde mevcut birçok kimyasal mekanizma bulunmaktadır. Yüksek karbonlu yakıtlar için geliştirilen detaylı kimyasal kinetik mekanizmalar genelde fazla sayıda bileşene ve kimyasal reaksiyona sahip olmaktadır. Zamana bağlı olmayan, sabit yanma şartlarına sahip analizlerde sıfır boyutlu çözümler ile yüksek karbonlu yakıtlar için detaylı kimyasal mekanizmalar kullanılarak çözüm yapmak günümüz bilgisayarı ile dakika mertebesine kadar indirgenmiştir [1].

Son yıllarda geliştirilen, sıfır boyutlu yanma analizi yapabilen yazılımlara, içten yanmalı motorları doğru ve efektif olarak modelleyebilme kabiliyeti kazandırılmaya çalışılmaktadır. Bu yazılımlardan biri olan SRM Suite [2] asıl geliştirilme amacı olan içten yanmalı motorlarda yanma ve emisyon analizlerini, stokastik çözüm metodu kullanarak yapabilmektedir. Stokastik çözüm denklemleri sayesinde yapılan içten yanmalı motor analizlerine göreceli olarak boyut kazandırmaktadır. SRM modeline eklenen hayali partiküller çözüm anında skolastik bir dağılım sergilerler. Her bir stokastik partikül için bulunduğu konuma göre ısı transferi denklemleri ile ilk çözüm yapılarak sıcaklığı hesaplanır. Bulduğu konuma göre sıcaklığı hesaplanan partikül için kimyasal kinetik modelin termodinamik verisi aracılığı ile yanma reaksiyonu çözümü yapılır. Bu sayede modelin farklı alanlarında farklı yanma reaksiyonları oluşarak sanki 3 boyutluymuş gibi çözüm

yapılabilmektedir ve bu sayede diğer sıfır boyutlu çözümlerden daha doğru sonuçlar verebilmektedir. Yazılımın güvenilirliğini ve kabiliyetini inceleyen birçok yayın literatürde bulunmaktadır. Farklı motor konseptleri ve yanma koşullarında SRM yazılımının kullanılabilirliğini tespit etmek için yapılan çalışmalardan bazıları; manifolddan yakıt püskürtmeli HCCI motor modellemesi [3] [4] [5] alternatif yakıt karışımlarının motor yanmasına etkilerinin modellenmesi [6] [7] erken ve tek enjeksiyonlu HCCI motor modellemesi, çift püskürtmeli HCCI motor modellemesi [8] [9] çoklu-çevrimli sürekli olmayan simülasyon ve kontrolü [10] [11] [12], is oluşumu [13] ve HAD programı olan KIVA programı [14] ile ortak çalışarak yanma analizleri gerçekleştirmişlerdir.

Deney sistemlerinin hem maliyetli hem de uzun zaman alan prosedürler olmasından dolayı içten yanmalı motorların yanmasını analiz edebilmek için HAD yazılımlarının kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Motor tasarımı yapılırken deneysel çalışmanın yerine bilgisayar ortamında tasarımların gerçekleştirilmesi zamandan ve maliyetten ciddi oranda tasarruf sağlanmasına olanak vermektedir. Silindir içi yanma analizi yapan birçok HAD yazılım mevcuttur ve motor yanması konusunda günümüze kadar birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Doğalgaz yakıtı ile çalışan bir HCCI motorda ön yanma odasının olması ve olmaması durumunda silindir içi yanma ve emisyon parametreleri AVL FIRE yazılımı ile incelenmiş ve ön karışım odasının olmaması durumunda maksimum yanma basıncı ve ısı yayılım oranının arttığı, NO emisyonunun yanma odasının orta kısmında oluştuğu, CO ve HC emisyonlarının ise azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük eş değerlik oranlarında ön karışım odasının olmamasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [15]. Doğalgaz ve dizel çift yakıtı ile çalışan HCCI bir motorda EGR oranlarının değişiminin etkisi AVL FIRE yazılımı yardımıyla incelenerek ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. EGR oranının artması ile ateşlenme oranı artmış, maksimum basınç ve sıcaklık azalmış, egzoz kayıpları artmış aynı zamanda toplam ısı kaybı ve yanmış yakıt miktarlarında azalma meydana geldiği görülmüştür [16]. BRY yakıtı ile çalışan bir HCCI motorda H₂O₂ kimyasal bileşeninin oluşumu hem deneysel hem de ANSYS-Fluent HAD ve SRM simülasyonları ile incelenmiştir. Ön yanmanın oluşumu ve ana (hızlı)

yanmanın başlaması için önemli birer bileşen olan H_2O_2 'nin için yapılan deneyler bilgisayar ortamında tekrar edilmiş ve simülasyon sonuçlarının deneysel veriler ile uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [17]. BRY yakıt için geliştirilen kimyasal kinetik mekanizma şok tüpü, laminer alev hızı ve HCCI bir motorda deneysel veriler ile analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde geliştirilen mekanizmanın iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [18]. Düşük eş değeri oranlarında çalışan bir HCCI motorun silindir içi yanma analizleri çok boyutlu KIVA3V-MZ-MPI yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölü hacimdeki artık yakıtlar ve sıcaklığa etkileri ve bunun yanında yakıtın ne kadar kısmının yanmadan atıldığı ortaya konulmuştur [19].

Literatürdeki çalışmalarda genellikle silindir içi yanma simülasyonlarının tek bir simülasyon aracı için doğruluğunun tespiti için yapıldığı görülmüştür. Fakat birbirlerine göre üstünlükleri bilinen farklı modelleme tekniklerinin aynı olayın modellenmesinde birbirlerine göre olan durumları üzerine sınırlı sayıda çalışmanın olduğu anlaşılmaktadır. Bu sebeple iki farklı yakıt ve farklı hava fazlalık oranları için HCCI motorda yapılan deneysel çalışmalar, birbirlerinden farklı yöntemlerle modelleme yapan iki farklı yazılım kullanılarak simüle edilmiştir. Her iki modelleme tekniğinin performansları elde edilen veriler kullanılarak incelenmiştir.

2. DENEYSEL VE MODELLEME PARAMETRELERİ (EXPERIMENTAL AND MODELLING PARAMETERS)

Deneysel çalışmalar İngiltere'de bulunan Shell laboratuvarında tek silindiri, 4 valfli, eğimli çatılı silindir kafasına sahip deneysel Ricardo Hydra motorunda yapılmıştır. Motor özellikleri Tablo 1 de ayrıntılı olarak verilmiştir. Deneysel kurulumda HCCI şartlarını yakalayabilmek için piston tepesi yükseltılarak sıkıştırma oranı 14.04 değerine getirilmiş ve silindir içine giriş sıcaklık değeri ise 80 °C ve silindire alınan havanın basıncı da 2 bar'a yükseltilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada emme manifoldundan silindir içine giren havanın basıncı 2 bar ve hava fazlalık katsayısı (HFK) değerleri ise değiştirilerek ön karışım odasında hava yakıt karışımı hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmada yakıt karışımı test edilmiştir. BRY-85 %85 iso-oktan ve %15 n-heptan karışımından oluşmaktadır. BRY yakıtın yanmasını kimyasal olarak modelleyebilmek için Tsurushima tarafından geliştirilen 33 bileşen ve 38 reaksiyon içeren BRY kimyasal kinetik mekanizması kullanılmıştır [20].

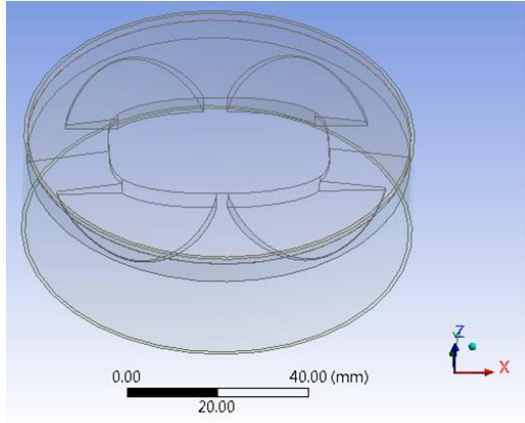
Tablo 1. Motor parametreleri (Engine Parameters)

Parametre	Değer	Birim
Silindir çapı	86	mm
Strok	86	mm
Biyel kolu uzunluğu	143.5	mm
Sıkıştırma oranı	14.04	-
Motor devri	1200	dev/dak
Toplam valf sayısı	4	-
Emme valfi açılma zamanı	340 ÜÖNÖ	⁰ KMA
Emme valfi kapanma zamanı	108 ÜÖNÖ	⁰ KMA
Egzoz valfi açılma zamanı	120 ÜÖNS	⁰ KMA
Egzoz valfi kapanma zamanı	332 ÜÖNS	⁰ KMA

SRM simülasyonları SRM Engine Suite V7.3. ile yapılmıştır. SRM yazılımında analizler tablo 1'de verilen deneysel şartlar değiştirilmeden kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SRM yazılımında gerçekleştirilen analizler emme valfi kapanma zamanı (EVK) ile egzoz valfi açılma (EVA) zamanlarını kapsamaktadır. Başlangıç koşulları olarak EVK zamanındaki basınç ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Deneysel şartlardaki yakıt karışımı kütleli olduğu için SRM yazılımında da karışım değerleri kütleli oranlar kullanılarak girilmiştir. Stokastik partikül miktarı ise 300 olarak ayarlanmıştır. Çözüm için adım aralığı 0.1 krank mili açısı (KMA) olarak alınmıştır. Stokastik partikül ağırlık faktörü ise 12 olarak alınmıştır. Türbülans model olarak lokal karışım modeli kullanılmış ve sayısal değer olarak 0.005 s alınmıştır. Çeperlerden gerçekleşen ısı transferi için duvar sıcaklığı sabit 430 K olarak yazılıma girilmiştir. SRM yazılımında kullanılan başlangıç ve sınır koşulları HAD yazılımında da değiştirilmeden kullanılmıştır.

HAD simülasyonları ANSYS Fluent 14.0 ile yapılmıştır. Şekil 1'de görülen deneysel motorun piston üstü ve yanma odası geometrisi gerçek ölçüler kullanılarak ANSYS yazılımında bulunan Design Modeller modülü kullanılarak çizilmiş ve çizilen 3 boyutlu CAD model HAD analizlerinde kullanılmıştır. HAD simülasyonlar emme valfi kapanma zamanından (EVK) egzoz valfi açılma (EVA) zamanına kadar sürdürüldüğü için 3

boyutlu modele valf geometrisinin eklenmesine ihtiyaç duyulmamıştır. Bu sebeple HAD analizinde SRM modelinde olduğu gibi başlangıç koşulu olarak yakıtla yanma havasının tam homojen bir karışım halinde bulunduğu kabul edilmiştir. Bu durum deneysel çalışma ile de örtüşmektedir çünkü deneysel sistemde hava ile yakıt karışımı ön karışım odasında hazırlanıp silindir içerisine emme supapından içeri alınmaktadır. Silindir ile piston arasında kalan ve krevis olarak isimlendirilen hacimde ayrıca modele eklenmiştir. Bu bölgede, gerçekte olduğu gibi bir miktar yakıtın yanmadan kalacağı ve HAD simülasyonunun gerçekliğini arttıracığı düşünülmüştür. Tam modelin oluşturulmasında en büyük etken piston yüzeyinin farklı bir geometrik yapıya sahip olmasıdır. Bu durum analiz süresini ciddi ölçüde arttırsa da analiz sonuçlarına önemli bir katkıda bulunacağı bilinmektedir.



Şekil 1. Silindir hacminin CAD modeli (CAD Model of Cylinder Volume)

HAD analizlerinde en fazla dikkat edilmesi gereken şeylerden biri de ağ yapısı modelidir. Ağ yapısı ne kadar düzenli ve yeterli sayıda olursa yapılan analiz de o kadar sağlıklı ve güvenilir olmaktadır. Elbette çözüm süresi çok önemli bir faktördür ve bu yüzden oluşturulacak ağ yapısının analizin olabildiğince yakınsamasını sağlayacak ölçüde yeterli, çözüm süresini de en aza indireyecek kadar az olması sağlanmalıdır. Bu çalışmada yapılan analiz zamana bağlı çözümlerden oluşmaktadır. Zamana bağlı ve dinamik ağ yapısı kullanılarak yapılan analizler toplam çözüm süresini çok büyük boyutlara taşımaktadır. Ayrıca HAD çözümüne kimyasal kinetik mekanizmalar gibi ek çözümler de eklendiğinde bu süre mekanizmaların büyüklüğüne göre katlanarak artmaktadır. Şekil 2’de modeli hazırlanmış silindir içi geometrisinin ağ yapısı görülmektedir. Ağ yapısı piston üst ölü

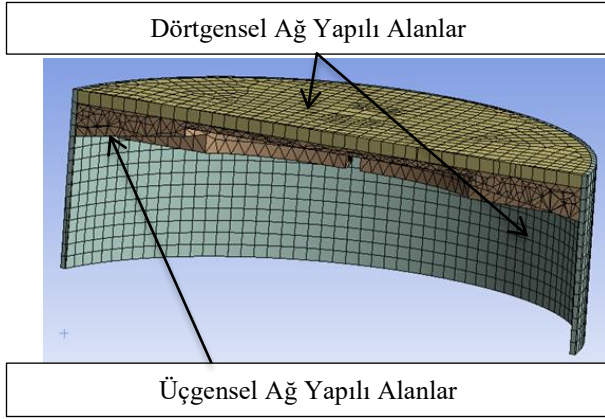
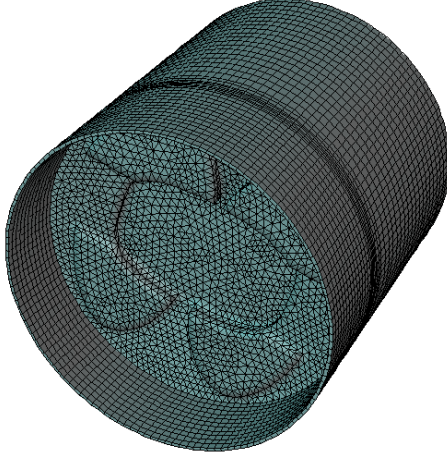
noktada (ÜON) iken oluşturulmuştur. Daha sonra HAD yazılımında dinamik ağ yapısı oluşturularak piston istenen KMA’ya çekilebilmektedir. Toplam hücre sayısı piston ÜON da iken 34000 adet ve alt ölü noktada iken 70795 adettir. Model, eğriler ve düzensiz hacimlerden oluştuğu için piston üstü hacminde prizma, diğer hacimler ise dörtgen ve düzenli ağ yapılarına sahiptir. Şekil 2’de farklı açılardan ve kesitlerden bu yapılar görülmektedir. Dinamik modelin düzgün çalışabilmesi için dörtgen ve düzenli ağ yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Piston üstü bölgesinin geometrisi düzenli ağ yapısı oluşturulamayacak düzeyde karmaşık bir geometriye sahip olduğu için piston üst bölgesi hacminin küçük bir kısmına üçgen ve dörtgen ağ yapısı oluşturulmuş. Geri kalan hacimlere ise daha düzenli ve dörtgenlerden oluşan ağ yapısı uygulanmıştır. Oluşturulan bu ağ yapıları çözüm optimizasyonunda dikkate alınarak mümkün olan minimal düzeye çekilmeye çalışılmıştır.

3. ANALİZ VE DENEYSEL VERİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND ANALYSES DATA)

HCCI motorda 4 farklı hava fazlalık katsayısı için yapılan analizler ve deneysel olarak ölçülen basınç, ısı yayılım oranı ve yanma sonu meydana gelen CO, CO₂ ve O₂ emisyon yüzdeleri kıyaslanmıştır. HFK için sırasıyla; 4.1, 4.5, 4.75 ve 5 değerleri göz önüne alınarak simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 3’de 4 farklı HFK değeri için basınç eğrileri verilmiştir. Basınç eğrileri incelendiğinde HFK 5 için deneysel basınç eğrisinin HAD analizi ile uyumlu olduğu fakat SRM analizinde yanmanın erken başlamasından kaynaklı olarak basıncın erken artmaya başladığı görülmektedir. Diğer basınç eğrileri incelendiğinde deneysel ve analiz sonuçlarının birbiri ile örtüştüğü gözlemlenmiştir. HAD simülasyonlarında toplam çözüm süresi yaklaşık 140 saat/CPU (7 CPU çalıştırılmıştır yaklaşık 20 saat sürmüştür) sürer iken, SRM simülasyonlarında aynı çalışma için bu süre 8 saat/CPU (8 CPU çalıştırılmıştır yaklaşık 1 saat sürmüştür).

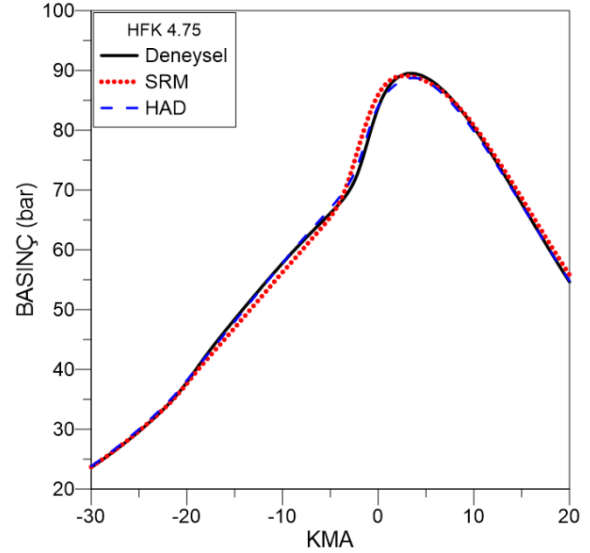
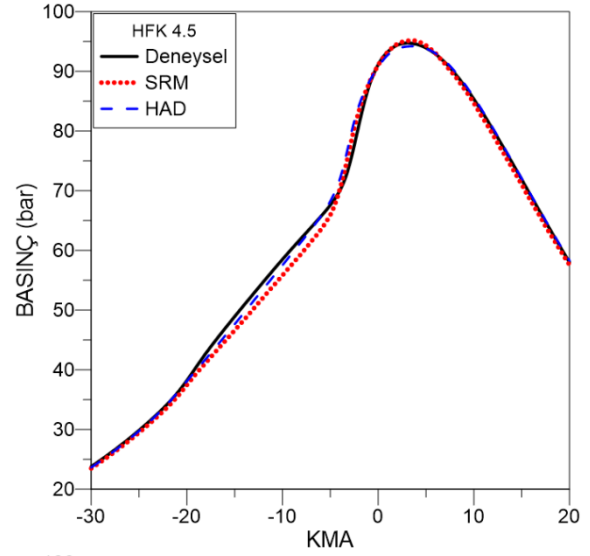
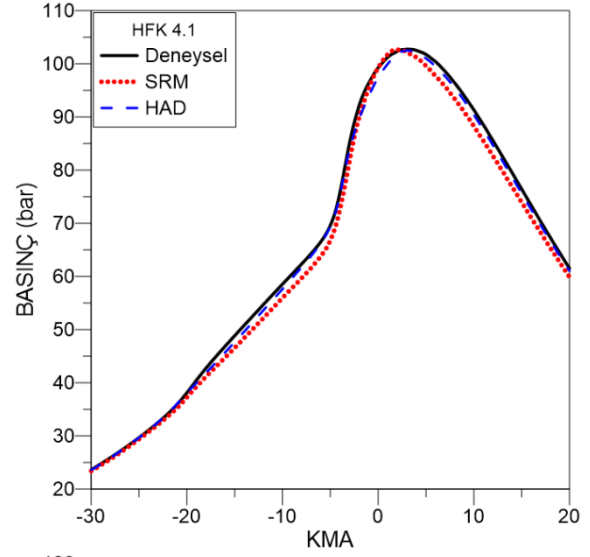
Şekil 4’de 4 farklı HFK değeri için elde edilen ısı yayılım oranı grafikleri mevcuttur. Isı yayılım oranı verileri için çizilen her bir grafikte görüldüğü üzere soğuk yanma olarak isimlendirilen ve -25 ve -15 KMA arasında ortaya çıkmış olan bölge için tam olarak deneysel değerlere ulaşmadığı ama yine de yanmanın olduğu bölgelerde deneysel

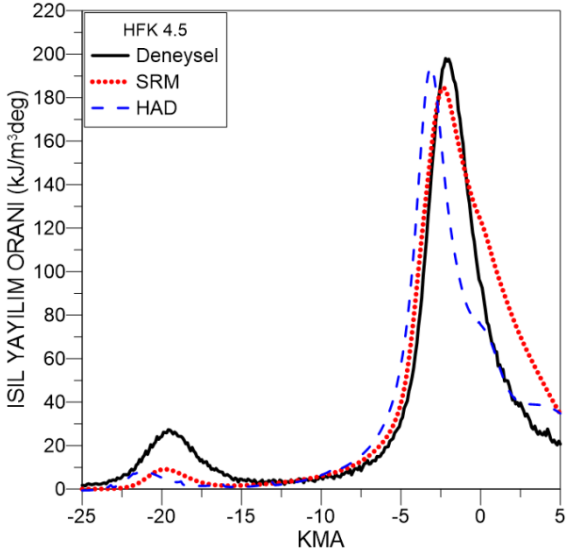
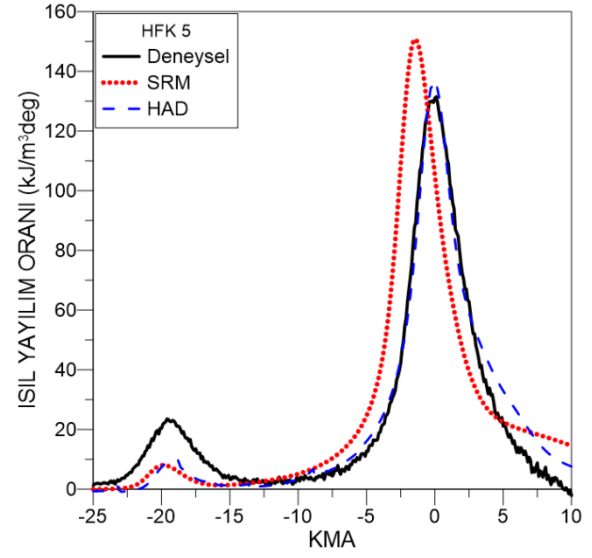
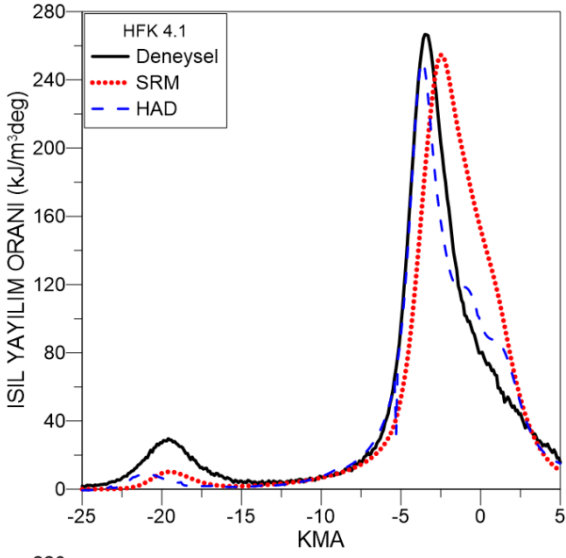
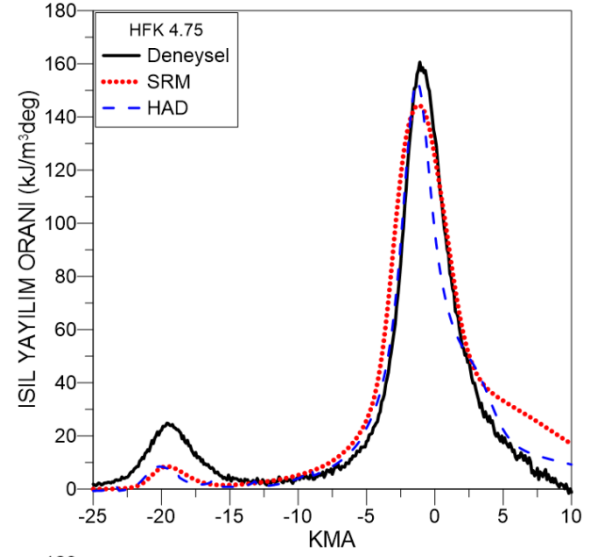
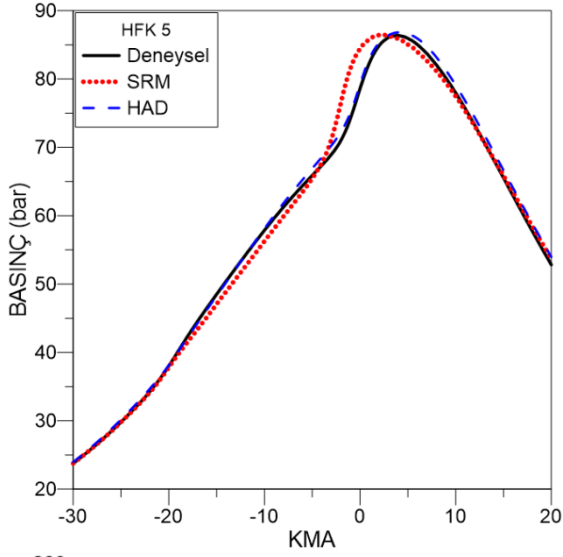
eğrilere çok daha iyi yakınsamanın ortaya çıktığı görülmektedir. HFK 5 için elde edilen veriler incelendiğinde HAD analizi sonuçlarının deneysel veriler ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Fakat SRM analizinde yanmanın erken başlamasından kaynaklı olarak ısı yayılım grafiğinden anlaşıldığı üzere maksimum noktanın daha yüksek ve daha erken KMA’da ortaya çıktığı görülmektedir.



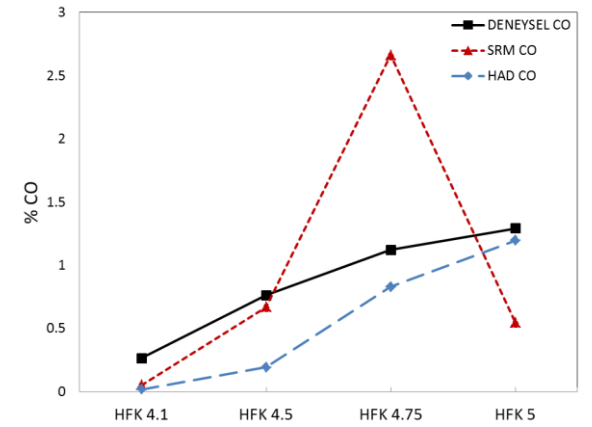
Şekil 2. Piston alt ölü noktada iken ağ yapısının görüntüsü (üstte), piston üst ölü noktada iken ağ yapısının görüntüsü (altta), (view of mesh when the piston at the bottom dead center (top), view of mesh when the piston at the top dead center (bottom))

Şekil 5’de 4 farklı HFK değeri için CO, CO₂ ve O₂ yanma sonu ürünlerde yüzdesel değer grafikleri mevcuttur. Emisyon grafikleri incelendiğinde 4 farklı HFK için deneysel veri ile genel olarak aynı artış ve azalış eğilimde olduğu anlaşılmaktadır. Fakat CO emisyonu verilerinde HFK 4.75 ve 5 için SRM yazılımından elde edilen sonuçların ani artış ve azalış eğilimde olduğu ve bu nedenle diğer sonuçlara göre daha uyumsuz olduğu anlaşılmaktadır.

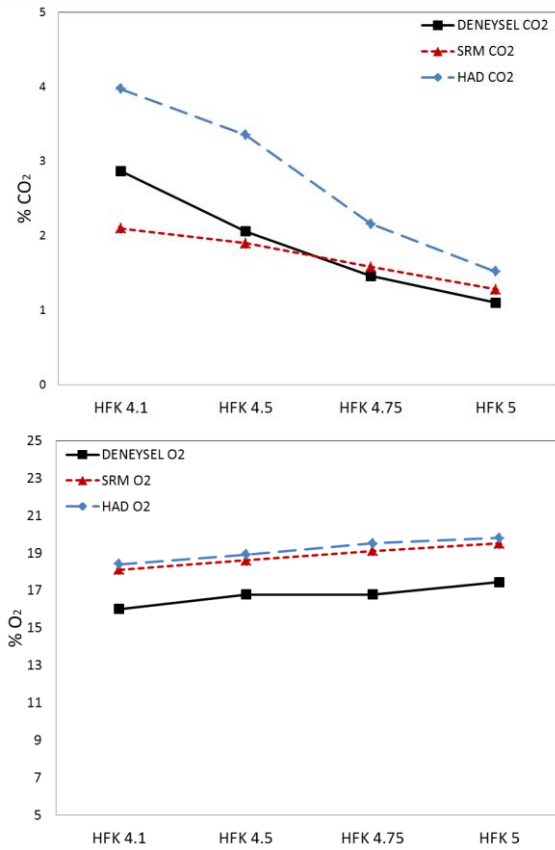




Şekil 4. Deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen ısı yayılım oranı değerinin kıyaslanması (Comparison of the heat release rate results of simulation and experimental studies)



Şekil 3. Deneysel ve simülasyon çalışmalarının basınç eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of the pressure curves of experimental and analysis studies)



Şekil 5. Deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen CO, CO₂ ve O₂ emisyonlarının yüzdesel değerinin kıyaslanması (Comparison of the CO, CO₂ and O₂ emissions percentage results of simulation and experimental studies)

Genel eğilim incelendiğinde HFK artması sonucu karışımın fakirleşmesi nedeniyle CO₂ emisyonu azalmaya başladığı, CO emisyonunun artmaya başladığı ve O₂'nin yanma sonu ürünlerdeki değerinin arttığı anlaşılmaktadır. Bu durum HFK artması ile yanmanın tam olarak gerçekleşme oranının azaldığı anlamına gelmektedir.

HCCI motorun çalışma koşulları tam homojen olacak şekilde, yani ön karışım odalı bir tasarıma sahiptir. Bu sebeple yanma anında maksimum ortalama sıcaklık 1600 K'ni geçmemiştir ve NO_x oluşumu silindir içi yanma olayında 1800 K civarında yoğun miktarda oluşmaya başladığı bilinmektedir. Deneysel ölçüm cihazının ölçüm aralığının altına NO_x emisyonu oluştuğu için ölçüm yapılamamıştır. Deneysel veri olmadığı için simülasyon çalışmalarından elde edilen NO_x verileri çalışmaya eklenmemiştir.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (RESULT AND CONCLUSIONS)

Silindir içi yanma modelinde asıl amaç silindir içinde piston alt ölü noktada iken hali hazırda bulunan hava-yakıt karışımının sıkışma esnasında

nasıl bir yanma rejimi izlediğinin ve emisyonlara nasıl etki ettiğinin incelenmesiydi. Bu çalışmada yanma sonucu silindir içinde oluşan basınç, ısı yayılım oranı ve yanma sonu ürünlerde bulunan CO, CO₂ ve O₂ deneysel basınç verileri ile karşılaştırılması hedeflendi. İki farklı yakıt ve her birinde 4 farklı hava fazlalık katsayısı değeri için SRM ve HAD analizleri ile deneysel ölçüm sonuçları her bir veri için karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

- Yapılan bu çalışmada motorun HCCI modunda olması yani motorun ön karışımli olarak kullanılması ile yanma verimliliğinde artış sağlanırken emisyonlarda ise azalış olduğu bilinmektedir fakat HFK çok artması ile karışımın çok fakirleşmesi nedeniyle yanmanın kötüleştiği deneysel ve simülasyon çalışmaları sonucunda anlaşılmıştır.

- Deneysel basınç, emisyon ve ısı yayılım oranı grafikleri ile SRM ve HAD simülasyon sonuçlarının genel olarak uyumlu olduğu fakat HFK artması ile yanma kalitesinin düşmesi sonucu simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle uyumunun azaldığı görülmektedir.

- SRM Suite programı 0-boyutlu yanma analizi yapmasına rağmen HCCI motorun deneysel verilerine çok yakın sonuçlar verdiği ve HAD analizleri kadar iyi çözüm performansına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

- SRM yazılımında büyük kimyasal mekanizmaların kullanılabilmesi ve analiz süresinin de HAD yazılımlarına göre oldukça kısa olması, silindir içi yanma simülasyonları için büyük bir avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

Yukarıdaki açıklamalara ek olarak daha önce yapılan çalışmalarda [4] [21] SRM yazılımının HCCI yanması performansı ile 0 boyutlu yanma simülasyonu yapan bir yazılımın performansı karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar SRM yazılımının diğer yazılıma göre deneysel verilere çok daha iyi yakınsadığını göstermiştir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- J. C. G. Andrae, T. Brinck ve G. T. Kalghatgi, «HCCI experiments with toluene reference fuels modeled by a semidetalled chemical

- kinetic model,» *Combustion and Flame*, cilt 155, no. 4, pp. 696-712, 2008.
- [2] «CMCL Innovations,» [Çevrimiçi]. Available: <http://www.cmclinnovations.com/>. [%1 tarihinde erişilmiştir22 01 2015].
- [3] M. Kraft, P. Maigaard, . F. Mauss, . M. Christensen ve . B. Johansson, «Investigation of combustion emissions in a homogeneous charge compression injection engine: Measurements and a new computational model,» *Proceedings of the Combustion Institute*, cilt 28, no. 1, pp. 1195-1201, 2000.
- [4] U. Demir, N. Yılmaz, G. Coskun ve H. S. Soyhan, «Evaluation of zero dimensional codes in simulating IC engines using primary reference fuel,» *Applied Thermal Engineering*, cilt 76, pp. 18-24, 2015.
- [5] P. Maigaard, F. Mauss ve M. Kraft, «Homogeneous Charge Compression Ignition Engine: A Simulation Study On The Effects Of Inhomogeneities,» *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, cilt 125, no. 1, pp. 466-471, 2003.
- [6] A. Bhave, M. Balthasar, M. Kraft ve F. Mauss, «Analysis of a natural gas fuelled homogeneous charge compression ignition engine with exhaust gas recirculation using a stochastic reactor model,» *International Journal of Engine Research*, cilt 5, no. 1, pp. 93-104, 2004.
- [7] S. Mosbach, M. Kraft, A. Bhave, F. Mauss, J. H. Mack ve R. W. D. Dibble, «Simulating a homogenous charge compression ignition engine fuelled with a DEE/EtOH blend,» *SAE Technical Paper*, no. 2006-01-1362, 2006.
- [8] A. Turkcan, A. N. Özsezen, M. Çanakçı, G. Coşkun, H. S. Soyhan ve U. Demir, «An Experimental And Modeling Study To Investigate Effects Of Two-Stage Direct Injection Variations On HCCI Combustion,» *Combustion Science And Technology*, cilt 187, no. 4, pp. 642-658, 2015.
- [9] S. Mosbach, H. Su, M. Kraft, A. Bhave, F. Mauss, Z. Wang ve J.-X. Wang, «Dual injection HCCI engine simulation using a stochastic reactor model,» *International Journal of Engine Research*, cilt 8, no. 1, pp. 41-50, 2007.
- [10] A. M. Aldawood, S. Mosbach ve M. Kraft, «HCCI combustion phasing transient control by hydrogen-rich gas: Investigation using a fast detailed-chemistry full-cycle model,» *SAE*, Detroit, 2009.
- [11] J. E. Etheridge, S. Mosbach, M. Kraft, H. Wu ve N. Collings, «A detailed chemistry multi-cycle simulation of a gasoline fueled HCCI engine operated with NVO,» *SAE Technical Paper*, no. 2009-01-0130, 2009.
- [12] S. Mosbach, M. Aldawood ve M. Kraft, «Real-time evaluation of a detailed chemistry HCCI engine model using a tabulation technique,» *Combustion Science and Technology*, cilt 180, no. 7, pp. 1263-1277, 2008.
- [13] S. Mosbach, . M. S. Celnik, A. Raj, M. Kraft, H. R. Zhang, S. Kubo ve . K.-O. Kim, «Towards a detailed soot model for internal combustion engines,» *Combustion and Flame*, cilt 156, no. 6, pp. 1156-1165, 2009.
- [14] L. Cao, H. Su, S. Mosbach, M. Kraft ve A. Bhave, «Studying the influence of direct injection on PCCI combustion and emissions at engine idle condition using two dimensional CFD and stochastic reactor model,» *SAE Technical Paper*, no. 2008-01-0021, 2008.
- [15] A. Yousefia, A. Ghareghania ve M. Biroukb, «Comparison study on combustion characteristics and emissions of a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine with and without pre-combustion chamber,» *Energy Conversion and Management*, cilt 100, pp. 232-241, 2015.
- [16] S. Jafarmadar, P. Nemati ve R. Khodaie, «Multidimensional modeling of the effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on exergy terms in an HCCI engine fueled with a mixture of natural gas and diesel,» *Energy Conversion and Management*, cilt 105, pp. 498-508, 2015.
- [17] G. Coskun, . M. Jonsson, J. Bood, . M. Tunér, . M. Algotsson, . B. Li, Z. Li, . H. S. Soyhan, M. Aldén ve . B. Johansson, «Analysis of in-cylinder H₂O₂ and HO₂ distributions in an HCCI engine – Comparison of laser-diagnostic results with CFD and SRM simulations,» *Combustion and Flame*, cilt 162, no. 9, pp. 3131-3139, 2015.

- [18] X. Zhen, . Y. Wang ve . D. Liu, «A new improvement on a chemical kinetic model of primary reference fuel for multi-dimensional CFD simulation,» *Energy Conversion and Management*, cilt 109, pp. 113-121, 2016.
- [19] R. P. Hessel, D. E. Foster, S. M. Aceves, M. L. Davisson, F. Espinosa-loza, D. L. Flowers, W. J. Pitz, J. E. Dec, M. Sjöberg ve A. Babajimopoulos, «Modeling iso-octane HCCI using CFD with multi-zone detailed chemistry; comparison to detailed speciation data over a range of lean equivalence ratios,» *SAE Technical Paper*, no. 2008-01-0047, 2008.
- [20] T. Tsurushima, «A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion,» *Proceedings of the Combustion Institute*, cilt 32, pp. 2835-2841, 2009.
- [21] G. Coskun, U. Demir, N. Yilmaz ve H. S. Soyhan, «Investigation of performance of 0-D internal combustion engine simulation codes based on detailed and reduced chemical kinetic mechanisms,» *Int. J. Vehicle Design*, cilt 71, no. 1, pp. 377-388, 2016.