

Bir HCCI motorun 0-boyutlu yanma analizi

Üsâme Demir^{1*}, Ömer Mustafa Göbeloğlu² Hakan S.Soyhan³, Ekrem Büyükkaya⁴

16.05.2014 Geliş/Received, 02.10.2014 Kabul/Accepted

ÖZ

Bu çalışmada, homojen karışımli sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motorda yanma analizi yapılmıştır. Analizde, sıfır boyutlu yanma ve kimyasal mekanizma analizi yapılabilen Chemkin-Pro programı kullanılmıştır. Analiz sonuçları Shell araştırma merkezinde yapılan deney sonuçları ile doğrulanmıştır. Chemkin-Pro ile deneysel ortamlarda elde edilen veriler kullanılarak üretilen mekanizmalar ile değişik durumlara ait analizler hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Motor içerisindeki yanmanın analizini yapabilmek için hazırlanmış kimyasal kinetik mekanizmalar mevcuttur. Analizlerde deneysel motorda test edilen PRF yakıtına uygun iki adet kimyasal kinetik mekanizma kullanılmıştır. Aynı yakıt için geliştirilen iki farklı kimyasal mekanizmanın deneysel sonuçlara olan yakınlıklarına göre performansları incelenmiştir. Ayrıca diğer bir performans kriteri olarak çözücülerin ve mekanizmaların toplam analiz süresine etkileri de incelenmiştir. Analiz sonuçları, deneysel olarak mevcut olan basınç değerleri ile kıyaslanmıştır. Chemkin-Pro programında detaylı piston modellemesi olmadığından dolayı deneysel basınç değerleri ile analiz sonuçları arasında farklılıklar görülmüştür. Deneysel olarak elde edilen CO, CO₂ ve O₂ yanma sonu ürünleri de analiz sonuçları ile kıyaslanmış ve çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edemediğimiz sıcaklık ve yakıt değerleri için kimyasal kinetik mekanizmalar arasında kıyaslama yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HCCI motor, Yanma analizi, Chemkin-Pro, Egzoz Emisyonu

Zero dimensional combustion analysis of an HCCI engine

ABSTRACT

In this study, experimental results from a homogenous charge compression ignition (HCCI) engine fueled with PRF-85 (85% iso-octane and 15% n-heptane) were used to zero dimensional In this study, combustion analysis of homogenous charge compression ignition (HCCI) engine are examined. In the analysis, chemkin-pro software was used which can analysis 0-D combustion and chemical mechanism. Anlysys results are compared with the results of Shell research center. With the help of Chemkin-Pro, results of experiments and various combination mechanisms results can be easily compared. Prepared chemical kinetic mechanisms exist in order to make the analysis inside the engineer. Two chemical kinetic mechanism which is compatible to PRF fuel are used inside the experimental engine. Two different chemical which were developed for the same fuel are examined based on performance similarities on the experiments. Besides, effect of solvents and mechanism on total analysis time are also studied as performance criteria. Analysis results are compared with the existing experimental the pressure values. Since there is not a piston modeling inside the Chemkin-Pro, differences between experimental pressure values and analysis results are observed. Experimentally obtained combustion products of CO, CO₂ ve O₂ are also compared with the analysis results and similar results are observed. Temperature and fuel results which can not be obtained via experimentally are compared with the kinetic mechanisms.

Keywords: HCCI engine, combustion analyses, chemkin-pro, exhaust emission

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye - udemir@sakarya.edu.tr

2 DELTA Teknik Mühendislik., Adapazarı, Sakarya, Türkiye - maknimus@gmail.com

3 TEAM-SAN Ltd., Sakarya Üniversitesi, Teknokent, B07, Sakarya, Türkiye - hsoyhan@sakarya.edu.tr

4 Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye - ebkaya@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

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 çözücüler 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 simule edebilme kabiliyeti kazandırılmaya çalışılmaktadır. Bu yazılımlardan biri olan CHEMKIN-Pro'nun [2] asıl geliştirilme amacı, kimyasal reaksiyon mekanizmalarının doğruluğunu yanma gecikmesi analizi ile tespit etmektir[3,4]. Bunun yanında farklı reaktör tiplerinde de analiz yapabilme kabiliyeti bulunmaktadır. Bu reaktör tiplerinden biride sıfır boyutlu içten yanmalı motor reaktörüdür. Motor yanması için daha önce yapılan sıfır boyutlu çalışmalar ile yakıt sarfiyatı, EGR, giriş sıcaklığının ve farklı yakıtların homojen karışımı sıkıştırılmalı yanma (HCCI) motordaki yanmaya etkisi incelendiği bilinmektedir [5-13].

Bu çalışmada CHEMKIN-Pro yazılımı kullanılarak HCCI motoru için aynı koşullarda ve iki farklı kimyasal mekanizma ile analizler yapılmıştır. Aynı yakıt için geliştirilen iki farklı kimyasal mekanizmanın deneysel sonuçlara olan yakınlıklarına göre performansları incelenmiştir. Ayrıca diğer bir performans kriteri olarak çözücülerin ve mekanizmaların toplam analiz süresine etkileri de incelenmiştir. Analiz programlarının performans değerlendirmesinin daha sağlıklı olabilmesi için kullanılan 2 farklı mekanizmadan biri detaylı diğeri ise tam indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizmadır. Analiz sonuçları, deneysel olarak mevcut olan basınç ve değerleri ile değerlendirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen CO, CO₂ ve O₂ yanma sonu ürünleri de analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve mekanizmaların performansları ayrıca son ürünlere göre incelenmiştir. Bunun yanında deneysel olarak ölçülmesi zor olan emisyon verileri açısından da HCCI yanması incelenmiştir.

2. MODELLEME ÇALIŞMASI (MODELLING STUDY)

Deneysel çalışmalar İngiltere'de bulunan Shell laboratuvarında özel olarak tasarlanan 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 tepesini yükselterek sıkıştırma oranı 14.04 değerine getirilmiş ve silindir içine giren havanın sıcaklık değeri

250 °C'ye yükseltilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada emme manifoldundan silindir içine giren havanın basıncı 1 bar ve farklı Hava Fazlalık Katsayısı (HFK) değerleri olacak şekilde ön karışım odasında hava yakıt karışımı hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan PRF yakıtı %85 iso-oktan ve %15 n-heptan (PRF-85) karışımından oluşmaktadır.

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
Emme valfi çapı	32	mm
Toplam valf sayısı	4	-
Emme valfi açılma zamanı	340 ÜÖNÖ	KMA
Emme valfi kapanma zamanı	108 ÜÖNÖ	KMA
Egzoz valfi açılma zamanı	120 ÜÖNS	KMA
Egzoz valfi kapanma zamanı	332 ÜÖNS	KMA

Modelleme çalışması için 2 farklı analiz yapılmıştır. Yapılan analizler temel olarak iki grup altında toplanmıştır. 1. Gruptaki analizler indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma kullanılarak yapılmıştır. 2. Grup analizleri ise indirgenmiş mekanizma yerine detaylı kimyasal mekanizma kullanılarak yapılmıştır. Her iki analiz için kullanılan kimyasal kinetik mekanizmalar PRF yakıtı için geliştirilmiştir. Özellikle indirgenmiş kimyasal mekanizmalar, özel yanma şartlarına göre düzenlenmiş olmakla beraber bu çevre şartları aralığında çalıştırıldıklarında çok daha iyi performans göstermektedirler [14]. Analizler için kullanılan kimyasal kinetik mekanizmalardan indirgenmiş olanı Tsurushima [15] tarafından geliştirilen, 33 bileşen ve 38 reaksiyondan oluşan kimyasal mekanizmadır. Detaylı kimyasal mekanizma ise Westbrook ve ark. [16] tarafından geliştirilen 1550 bileşen ve 6000 reaksiyon içeren mekanizmadır ve literatürde PRF yakıtı için referans mekanizma olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, homojen karışımı sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motor 0 boyutlu yanma analizi ve kimyasal mekanizma analizi yapan Chemkin-Pro programı içerisindeki Internal Combustion Engine modu yardımıyla analizler yapılmıştır. Deneysel veriler Shell araştırma merkezinde yapılan HCCI verileridir. 1 deneysel veri sonucu alabilmek için yaklaşık 100 saatlik bir çalışma yapılması gerekmektedir. İşte bu zaman alan çalışmaları hızlandırmak için chemkin tarzı programlara başvurulmaktadır. Deneysel ortamlarda elde edilen verilerden üretilen mekanizmalarla değişik durumlara ait analizler hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.

Bu veriler ile chemkin-pro programında yapılan analizler basınç olarak kıyaslanmış ve deneysel olarak alınamayan

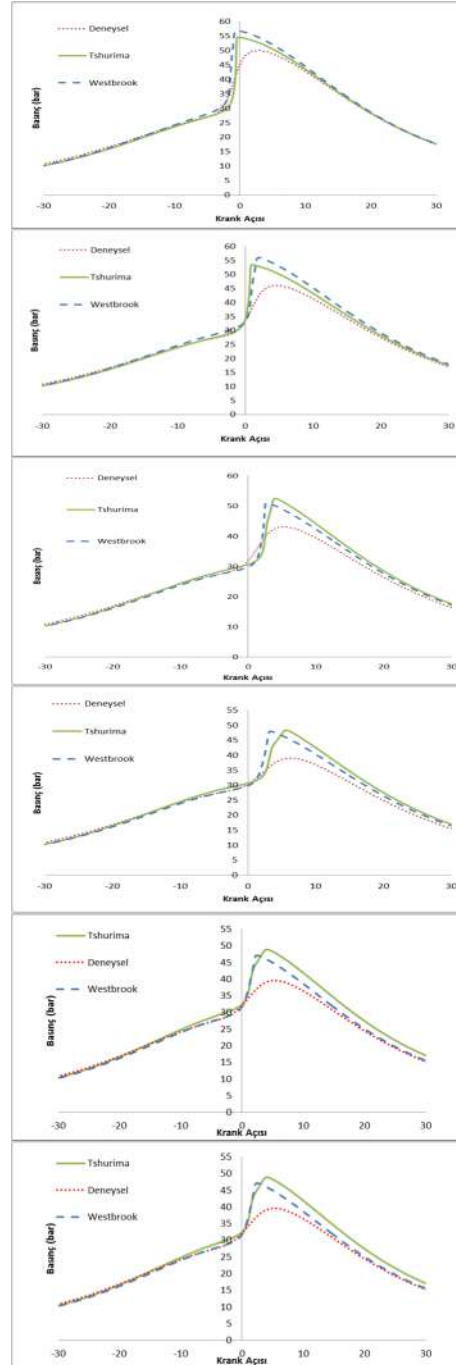
emiyon değerleri chemkin-pro programı yardımıyla elde edilmiştir. Bu çalışmada PRF yakıt kullanılmıştır. Altı farklı HFK (λ) incelemiştir. Bunlar sırasıyla ($\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$) bu değerler için chemkin pro programında yanmayı simule edebilmek için her iki kimyasal mekanizma da kullanılmıştır. Analiz sonuçları deneysel sonuçlarla uygunluk göstermektedir. Fakat Chemkin-pro programında piston modellemesi mevcut olmadığı için 3 boyutlu yanma analizi yapan programlara göre çok iyi olmasada yine de iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada bu iki farklı mekanizma için altışar adet olmak üzere toplamda 12 adet analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda sayısal veriler elde edilmiştir. Çıkan sayısal değerler yardımıyla grafikler çizilmiştir.

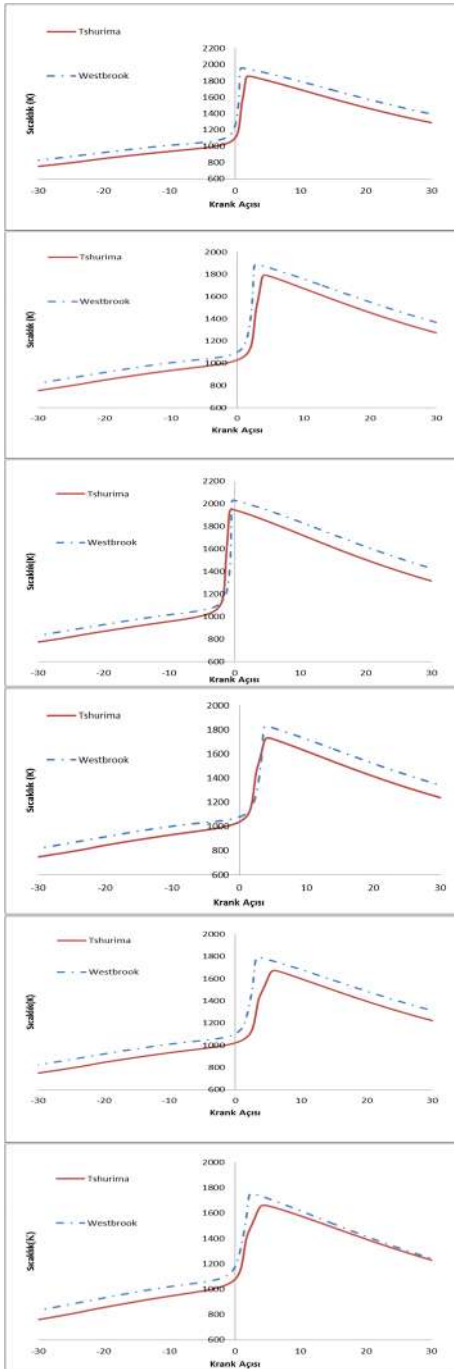
3. ANALİZ SONUÇLARI (ANALYSES RESULTS)

Analiz sonuçlarından krank açısına göre basınç değişimi, sıcaklık, C_7H_{16} , C_8H_{18} , CO , CO_2 , H_2O_2 ve OH ele alınmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen basınç, yüzdesel CO , CO_2 ve O_2 değerleri analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Deneysel olarak elde edilmesi zor olan krank açısına bağlı C_7H_{16} , C_8H_{18} , CO ve CO_2 bileşenleri analiz verileri kullanılarak yakıt tükeniminin nasıl gerçekleştiğini görmek için çizdirilmiştir. Bunun yanında HCCI yanmasında önemli rolü olan ara bileşiklerden H_2O_2 ve OH 'ı yanmanın nasıl gerçekleştiğini görmek için yine sadece analiz sonuçları kullanılarak çizdirilmiştir.

Şekil 1'de yer alan 6 adet basınç-krank açısı grafiklerinde farklı HFK değerleri için Tshurima ve Westbrook kimyasal kinetik modellerinin deneysel sonuçlara göre kıyaslanması görülmektedir. Grafiklerden de görüleceği üzere deneysel verilere göre daha hızlı basınç artışları yaşanmaktadır. Fakat basınç artışındaki ani yükselmelere rağmen mekanizmalar deneysel verilere oldukça yakın çıkmıştır. İki mekanizma arasında bir analiz yapılacak olursa, indirgenmiş kimyasal mekanizma detaylı kimyasal mekanizmaya göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Deneysel sonuçlara daha yakındır.

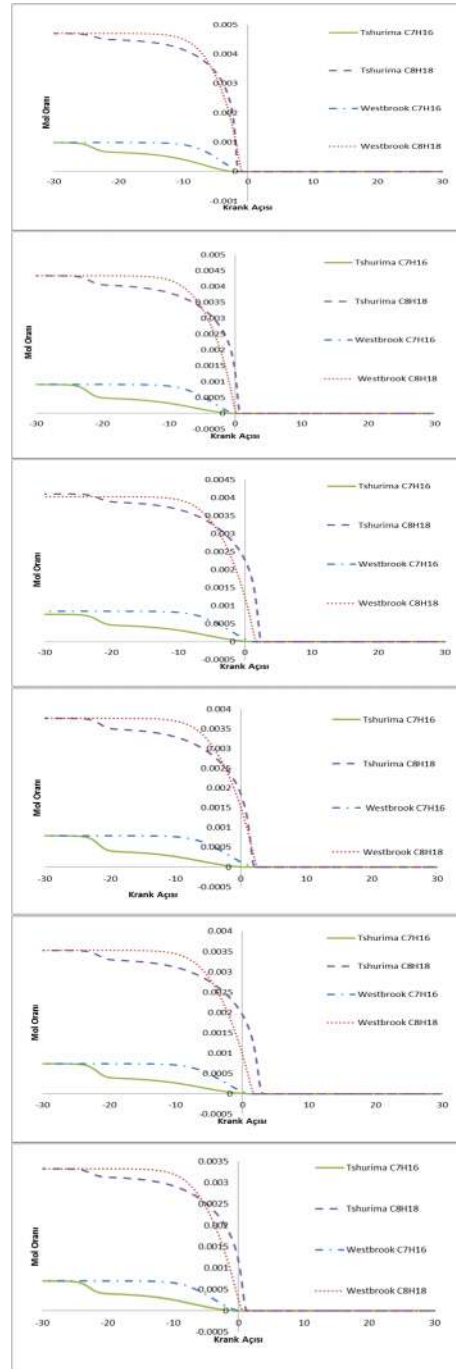


Şekil 1. Silindir İçi Basınç Grafikleri Sırasıyla $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$ (Pressure Curves in Cylinder Respectively $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$)



Şekil 2. Silindir İçi Sıcaklık Grafikleri Sırasıyla $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$ (Temperature in Cylinder Curves Respectively $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$)

Yukarıda yer alan sıcaklık-krank açısı grafiklerinde sadece kimyasal kinetik mekanizmalar kıyaslanmıştır. Farklı HFK değerleri için Tsurushima ve Westbrook mekanizmalarının sıcaklık eğrilerine bakıldığında yanma anındaki ani sıcaklık artışları göze çarpmaktadır. Maksimum sıcaklığın 2000 K mertebesinde olduğu görülmektedir.

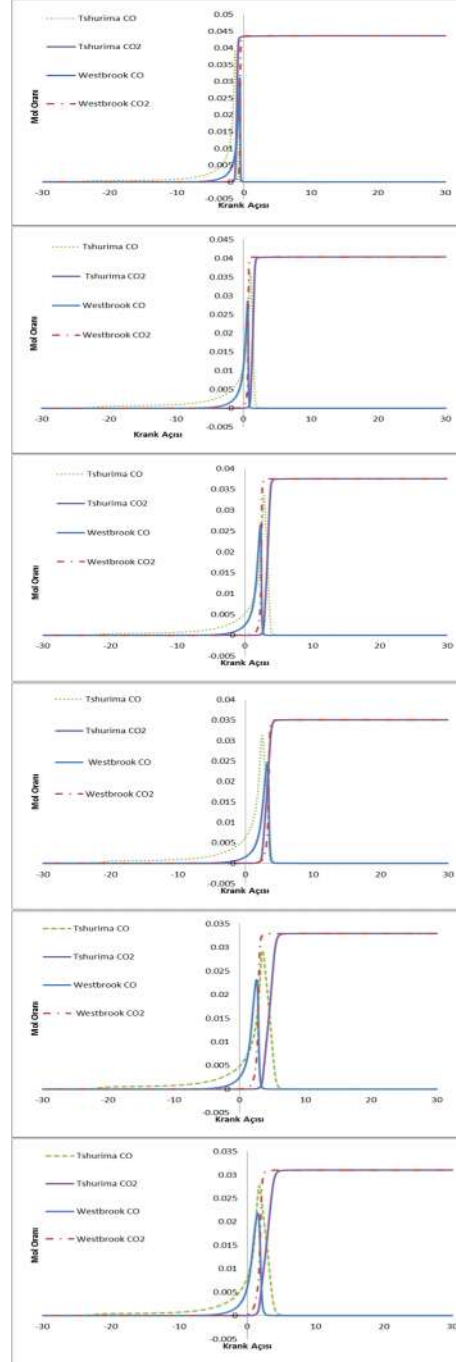


Şekil 3. Yakıt Tüketim Grafikleri Sırasıyla $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$ (Fuel Consumption Graphics Respectively $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$)

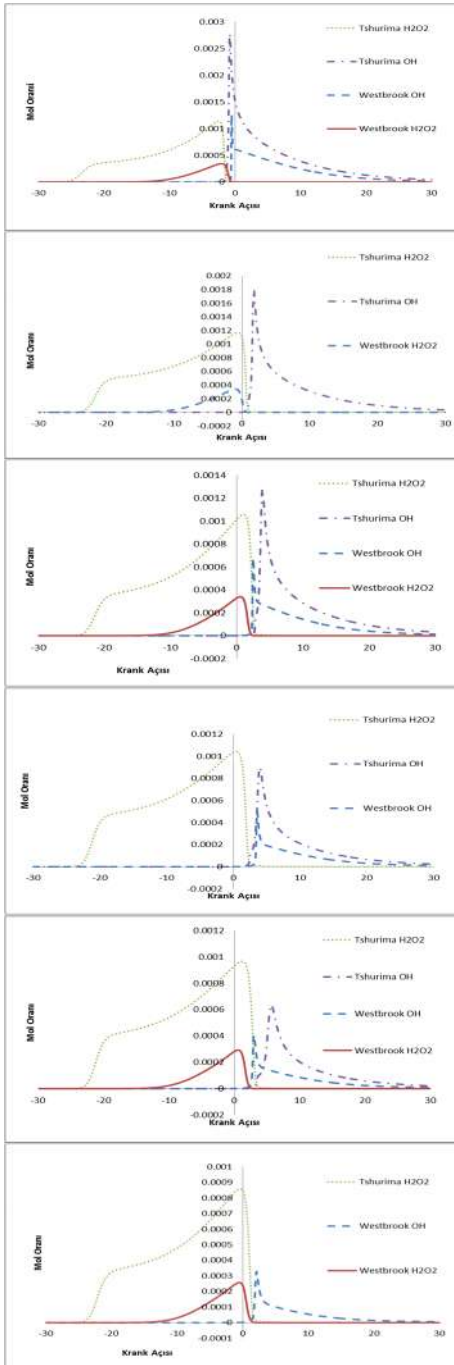
Yukarıdaki yakıt grafiklerine genel olarak bakıldığında yakıtın kütesel olarak %15'i olan C_7H_{16} bileşenin krank açısına bağlı olarak tüketimi indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma olan Tsurushima mekanizmasında daha hızlıdır. Başlangıçta 0,001 mol oranında bulunan yakıt yaklaşık olarak -25 krank açısı değerinde tükenmeye başlamıştır. Aynı bileşen için başlangıçta 0,001 mol oranında olan yakıt detaylı kimyasal kinetik

mekanizma olan Westbrook mekanizması için ise -10 krank açısı değerinde tükenmeye başlamıştır. Yakıtın kütleli olarak kalan kısmını oluşturan C_8H_{18} bileşeninin krank açısına bağlı olarak tüketiminde ise indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma olan Tsurushima mekanizması için başlangıçta 0,0045 mol oranında olan yakıt -25 krank açısında tükenmeye başlamıştır. Yine aynı miktardaki yakıt diğer mekanizma olan Westbrook için -10 krank açısında tükenmeye başlamıştır. Grafikte de belirgin olarak görüldüğü üzere detaylı mekanizmada yakıt daha geç yanmaya başlamasına rağmen daha hızlı tükenmektedir. Tsurushima mekanizma değerleri için yakıt daha erken yanmaya başlamıştır. Normal şartlarda yakıtın yanmaya başlaması için ilk önce buharlaşması ve ardından buhar fazında iken yanmaya başlaması gerekmektedir. Yani yakıtın yanma olayının gerçekleşebilmesi için belirli bir süre geçmesi gerektiği bilinmektedir. Bu grafiklere bakıldığında Westbrook ve ark. tarafından geliştirilen mekanizmanın yanma olayını çok kısa bir sürede gerçekleştirdiği görülmektedir. Fakat Tsurushima tarafından geliştirilen mekanizmada ise yanma olayı için belirli bir zaman geçirdiğinden dolayı gerçek yanmayı temsil edebilecek durumda olduğu görülmektedir.

Şekil 4'deki grafiklerde karbon monoksit ve karbondioksit oluşumunun krank açısına göre durumu incelenmiştir. Detaylı kimyasal kinetik mekanizma değerleri için CO grafiklerinde krank açısı -5 değerindeyken artmaya başlamıştır. -1 değerinde ise maksimum noktaya ulaşmıştır. Daha sonra sabit bir şekilde davranış gösterdiği görülmektedir. Detaylı kimyasal mekanizma değerleri için CO₂ grafiklerinde ise -1 krank açısında ani bir yükselişle çok kısa zamanda maksimum noktaya ulaşmaktadır. Daha sonra sabit davranış göstermekte olduğu gözlenmektedir. İndirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma için CO grafiklerinde krank açısı -15 değerindeyken yükselmeye başlamıştır. Krank açısı -2 değerindeyken maksimum noktaya ulaşmış ve sabitlenmiştir. Yine indirgenmiş kimyasal mekanizma için CO₂ grafiklerinde -1 krank açısında yükselmeye başlamıştır. Ani bir yükselişle yine aynı krank açısında maksimum seviyeye yükselmiş ve sabitlenmiştir. Genel olarak grafiklerden anlaşılacağı üzere yanmayı etkileyen hem kimyasal kinetik mekanizma hemde HCCI motorun modellenmesi olduğu görülmektedir. Chemkin-pro yazılımdan detaylı bir boyutlandırma olmayışı motor içerisindeki türbülans etkilemektedir. Aynı zamanda HCCI motor modunda yazılım içeride mükemmel bir karışım varsayarak yanma gerçekleştirdiği için yanmanın çok hızlı gerçekleştiği görülmektedir.



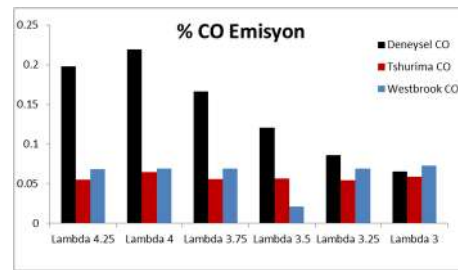
Şekil 4. CO ve CO₂ Oluşum Grafikleri Sırasıyla $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$ (CO and CO₂ Formation Graphics Respectively $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$)



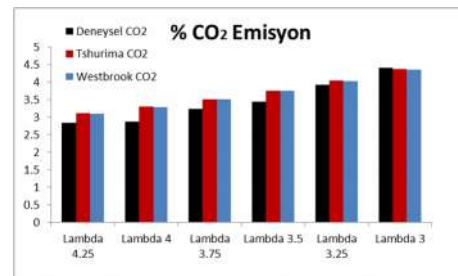
Şekil 5. H_2O_2 ve OH Oluşum Grafikleri Sırasıyla $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$ (H_2O_2 and OH Formation Graphics Respectively $\lambda = 3, 3.25, 3.5, 3.75, 4, 4.25$)

Yukarıdaki grafiklerde krank açısına bağlı olarak OH oluşumu ve H_2O_2 emisyon değerleri görülmektedir. Tsurushima indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma değerleri için OH grafikleri -1 ile +3 krank açısında ani bir yükselişe maksimum noktaya ulaşmakta ve daha sonra krank açısındaki artışla orantılı olarak azalmakta ve 30 krank açısı değerinde tükenmektedir. Westbrook detaylı kimyasal kinetik mekanizma değerleri için OH

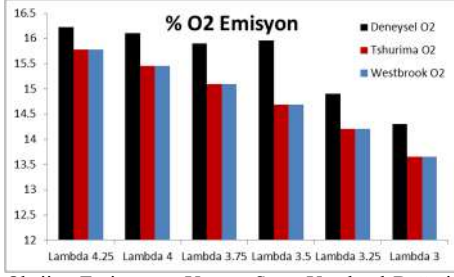
grafiklerine bakıldığında krank açısı -10 ile +3 değerleri arasında ani bir yükselişe geçmektedir. Oluşum miktarı açısından maksimum değeri indirgenmiş mekanizmadan daha az seviyede olduğu görülmektedir. Yine 30 krank açısında tükenmektedir. Tsurushima indirgenmiş kimyasal mekanizması için H_2O_2 emisyon değerleri 3, 3.5, 4, 4.25 HFK değerleri için -25 krank açısında yükselmeye başlamıştır. 3.25 ve 3.75 HFK değerlerinde ise +3 krank açısında yükselmeye başlamıştır. Westbrook detaylı kimyasal mekanizması için H_2O_2 emisyon değerleri ise 3, 3.5, 4, 4.25 HFK değerlerinde -12 krank açısında yükselmeye başlamıştır. 3.25 ve 3.75 HFK değerlerinde ise -25 krank açısında yükselmeye başlamaktadır. Westbrook detaylı kimyasal kinetik mekanizmasında tüm HFK değerleri için +2 krank açısında H_2O_2 emisyon değerlerinin sıfıra geldiği görülmektedir. Tüm grafiklerden görüleceği üzere indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma değerleri detaylı kimyasal kinetik mekanizma değerlerinden daha yüksektir. Dolayısıyla H_2O_2 'nin reaksiyonu daha hızlı gerçekleşmektedir.



Şekil 6. Karbonmonoksit Emisyonun Yanma Sonu Yüzdese Değeri (Carbonmonoxide emission value as percentage of at the end of combustion)



Şekil 7. Karbondioksit Emisyonun Yanma Sonu Yüzdese Değeri (Carbondioxide emission value as percentage of at the end of combustion)



Şekil 8. Oksijen Emisyonunun Yanma Sonu Yüzdese Değeri (Oxygen emission value as percentage of at the end of combustion)

Yukarıdaki grafiklerde deneysel sonuçlar ile 2 farklı mekanizma ve 6 farklı HFK değeri için analiz sonuçları görülmektedir. Egzoz subapının açılma anındaki CO (a) ve CO₂ (b) emisyonları yüzdese olarak verilmiştir. CO emisyonları bakımından Chemkin-Pro programının her iki mekanizma için deneysel sonuca çokta iyi yakın değerler ulaşamadığı görülmektedir. CO₂ ve O₂ egzoz anındaki yanma sonu ürünleri bakımından her iki mekanizmanın deneysel sonuca çok iyi yakınsadığı açıkça görülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada 0-Boyutlu yanma analizi yapan Chemkin-Pro yazılımı ile hem detaylı hem de indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma ile yapılan analiz sonuçlarına bakıldığında aşağıdaki yorumlar ortaya çıkmıştır.

- Modelleme yaparken detaylı mekanizmanın indirgenmiş mekanizmaya göre daha istikrarlı ve iyi sonuç vermiş olduğu giriş sıcaklığının deneysel değere daha yakın olduğundan anlaşılmaktadır. Emisyon grafiklerine bakıldığında ise normal şartlarda kimyasal kinetik mekanizma içerisindeki bileşen sayısı arttıkça analiz sonuçlarının daha iyi olacağı düşünülmekte olduğundan bilinmekte olan genel kanın aksine indirgenmiş mekanizmanın emisyon değerleri açısından neredeyse detaylı mekanizma ile aynı olduğu grafiklerden görülmektedir.
- Detaylı mekanizmanın kullanılmasının dezavantaj ise çözüm süresi olarak indirgenmiş mekanizmaya göre Chemkin-Pro programında analiz süresinin 10 kat artmasına neden olmuştur.
- Chemkin-Pro programı 0-Boyutlu analiz programı olması nedeniyle ve tüm yanma hacmini HCCI motor için homojen kabul ederek analiz yaptığı için analiz sonuçlarından özellikle silindir içi basınç eğrisi olarak deneysel sonuçlara çok iyi yaklaşmadığı basınç eğrilerinde görebilmekteyiz.

• Emisyonlara bakıldığında ise Chemkin-Pro programının deneysel emisyon değerlerine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Chemkin-Pro programının kimyasal kinetik mekanizma geliştirmede iyi olduğu bu sonuçlardan belli olmaktadır.

• Chemkin-Pro programının diğer bir üstünlüğü çok hızlı analiz yapabilmesidir. Analiz süresi olarak 3-Boyutlu programların saatler bazında analiz yaptığı bilinmektedir. Fakat Chemkin-Pro ile aynı analizlerin dakikalar mertebesinde ya da daha az bir sürede gerçekleştirilebilmesi en büyük artıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J.C.G. Andrae, T. Brinck and G.T. Kalghatgi, "HCCI experiments with toluene reference fuels modeled by a semidetained chemical kinetic model", *Combustion and Flame*, vol. 155, December, pp. 696-712, 2008
- [2] <http://www.reactiondesign.com> adresinden ulaşılabilir.
- [3] H.S. Soyhan, F. Mauss and C. Sorousbay, "Chemical Kinetic Modelling of Combustion in Internal Combustion Engines Using Reduced Chemistry", *Combustion Science and Technology*, Vol. 174, Pages 73-91, 2002
- [4] H. Karadeniz, H.S. Soyhan, C. Sorousbay, "Reduction of large kinetic mechanisms with a new approach to the necessity analysis method", *Combustion And Flame*, Cilt 159, Pages 1467-1480, 2012
- [5] W. Easley, A. Agarwal, and G. Lavoie, "Modeling of HCCI Combustion and Emissions Using Detailed Chemistry," *SAE Technical Paper 2001-01-1029*, 2001
- [6] M. Oguma, S. Goto, K. Oyama, K. Sugiyama, "The Possibility of Gas to Liquid GTL as a Fuel of Direct Injection Diesel Engine," *SAE Technical Paper 2002-01-1706*, 2002
- [7] T. Løvås, F. Mauss, C. Hasse, and N. Peters, "Modeling of HCCI Combustion Using Adaptive Chemical Kinetics," *SAE Technical Paper 2002-01-0426*, 2002
- [8] M. Elkelawy, Z. Yu-Sheng, H. El-Din and Y. Jing-zhou, "A comprehensive Modeling Study of Natural Gas HCCI Engine Combustion Enhancement by Using Hydrogen Addition," *SAE Technical Paper 2008-01-1706*, 2008
- [9] J. Zheng, J.A. Caton "Use of a single-zone thermodynamic model with detailed chemistry to study a natural gas fueled homogeneous charge compression ignition engine" *Energy Conversion and Management*, Volume 53, Issue 1, January, Pages 298-304, 2012

- [10] J. Zheng J., J.A. Caton, “Effects of operating parameters on nitrogen oxides emissions for a natural gas fueled homogeneous charged compression ignition engine HCCI: Results from a thermodynamic model with detailed chemistry” , Applied Energy, Volume 92, April ,pp 386-394, 2012
- [11] U. Demir, N. Yılmaz, G. Coşkun, H.S. Soyhan, “Evaluation of zero dimensional codes in simulating IC Engines Using Primary Reference Fuel” , Applied Thermal Engineering, Volume 76, Februaray, Pages 18-24, 2015
- [12] A. Turkcan, A.N. Özsezen, M. Çanakcı, G. Coşkun, H.S. Soyhan, U. Demir, “An Experimental and Modeling Study to Investigate Effects of Two Stage Direct Injection Variations on HCCI Combustion”, Combustion Science and Technology, Volume 187, Issue 4, April, Pages 642-658, 2015
- [13] H.S. Soyhan, “Performance of a homogeneous charge compression ignition engine fuelled with gasoline”, International Journal of Vehicle Design, Volume 59, Pages 223-233, 2012
- [14] C.J. Montgomery, D.A. Swensen, T.V. Harding, M.A. Cremer, M.J. Bockelie “A computational problem solving environment for creating and testing reduced chemical kinetic mechanisms” Advances in Engineering Software, Volume 33, Issue 2, February, Pages 59–70, 2002
- [15] T. Tsurushima “A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion”, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 32, Pages. 2835–2841, 2009
- [16] M. Mehl, W.J. Pitz, C.K. Westbrook, H.J. Curran “Kinetic modeling of gasoline surrogate components and mixtures under engine conditions”, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 33, Pages 193–200, 2011