

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HCCI BİR MOTORDA YANMANIN CHEMKIN  
YAZILIMIYLA MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ömer Mustafa GÖBELOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ**  
**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ekrem BÜYÜKKAYA**

**Aralık 2014**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HCCI BİR MOTORDA YANMANIN CHEMKIN  
YAZILIMIYLA MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Mustafa GÖBELOĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 23/03/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr. Ekrem BÜYÜKKAYA  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr. Halit YAŞAR  
Üye

  
Doç. Dr. Cenk ÇELİK  
Üye

## ÖNSÖZ

Bu çalışmaya her türlü yardım ve fedakârlığı sağlayan, bilgi, tecrübe ve güler yüzü ile çalışmama ışık tutan, çalışmamın yöneticisi Sayın Hocam Doç. Dr. Ekrem BÜYÜKKAYA'ya,

Çalışmamda kullanmış olduğum akış analiz programında (Chemkin) ve kimyasal kinetik mekanizma analizlerinde benden desteğini esirgemeyen okulumuzun Araştırma Görevlilerinden Sayın Usame DEMİR'e,

Tezimin hazırlanması sırasında beni cesaretlendiren ve manevi destek sağlayan değerli eşime, aileme ve çalışma arkadaşım Salih KILINÇARSLAN'a ithaf ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. HCCI Motorların Gelişimi .....	2
BÖLÜM 2.	
MODELLEME VE YÖNTEMLER.....	5
2.1. Sıfır Boyutlu Yanma Modelleri .....	5
2.2. Kimyasal Kinetik Model .....	7
BÖLÜM 3.	
CHEMKIN-PRO İLE MODELLEME ÇALIŞMASI .....	11
3.1. Model Parametreleri .....	11
3.2. Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi ve Çözümüne Başlama.....	12
3.3. Analiz Sonuçlarının Alınması .....	13
BÖLÜM 4.	
ANALİZ SONUCU GRAFİKLER .....	14
4.1. Basınç Grafikleri .....	14

4.2. Sıcaklık Grafikleri.....	18
4.3. Yakıt Grafikleri .....	22
4.4. CO ve CO <sub>2</sub> Grafikleri .....	26
4.5. OH ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Grafikleri.....	30
4.6. Yanma Sonucu Emisyon Değerlerinin Yüzdesele Gösterimi .....	34
BÖLÜM 5.	
SONUÇ ve DEĞERLENDİRME .....	36
KAYNAKLAR .....	38
ÖZGEÇMİŞ .....	42

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A_h$	: Silindir kafası alanı
$A_l$	: Silindir gömlek alanı
$A_p$	: Piston üst yüzey alanı
$B$	: Silindir çapı
$Q$	: Isı transferi
$h_g$	: Isı transfer katsayısı
$X$	: Yanmış kütle miktarı
$\theta_0$	: Yanmanın başladığı krank mili açısı
$\Delta\theta_b$	: Yanma Süresi
$\lambda$	: Hava fazlalık katsayısı
$P$	: Basınç
$T$	: Sıcaklık
$v$	: Hız
$T_{w-h}$	: Silindir kafası sıcaklığı
$T_{w-l}$	: Silindir yan yüzey sıcaklığı
$T_g$	: Gaz sıcaklığı
$T_{w-p}$	: Piston yüzeyi sıcaklığı
AÖN	: Alt ölü nokta
HAD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
Nu	: Nusselt Sayısı
Re	: Reynold Sayısı
Pr	: Prandtl Sayısı
HP	: Beygir gücü
KMA	: Krank mili açısı
ÜÖN	: Üst ölü nokta
HCCI	: Homojen dolgulu sıkıştırılmalı ateşleme

EGR : Egzoz gazı resirkülasyonu  
ÜÖNÖ : Üst ölü noktadan önce  
ÜÖNS : Üst ölü noktadan sonra

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Silindir içerisinde yanma sırasında yanmış ve yanmamış karışımların gösterilmesi .....	6
Şekil 2.2. n-heptan ve izo-oktan'ın düşük sıcaklıkta kimyasal oksidasyonunun şematik diyagramı .....	9
Şekil 4.1. Silindir Basıncının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4.25$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ) ...	14
Şekil 4.2. Silindir Basıncının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	15
Şekil 4.3. Silindir Basıncının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.75$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )...	15
Şekil 4.4. Silindir Basıncının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.5$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	16
Şekil 4.5. Silindir Basıncının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.25$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )...	16
Şekil 4.6. Silindir Basıncının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	17
Şekil 4.7. Silindir Sıcaklığının Krank Açısına Göre Değişimi( $\lambda=4.25$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )..	18
Şekil 4.8. Silindir Sıcaklığının Krank Açısına Göre Değişimi( $\lambda=4$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	19
Şekil 4.9. Silindir Sıcaklığının Krank Açısına Göre Değişimi( $\lambda=3.75$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )..	19
Şekil 4.10. Silindir Sıcaklığının Krank Açısına Göre Değişimi( $\lambda=3.5$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )..	20
Şekil 4.11. Silindir Sıcaklığının Krank Açısına Göre Değişimi( $\lambda=3.25$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )..	20
Şekil 4.12. Silindir Sıcaklığının Krank Açısına Göre Değişimi( $\lambda=3$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	21
Şekil 4.13. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4.25$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )..	22
Şekil 4.14. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	23
Şekil 4.15. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.75$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )..	23
Şekil 4.16. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.5$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )..	24
Şekil 4.17. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.25$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ )..	24
Şekil 4.18. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	25
Şekil 4.19. Krank Açısına Göre CO ve CO <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=4.25$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	26
Şekil 4.20. Krank Açısına Göre CO ve CO <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=4$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	27
Şekil 4.21. Krank Açısına Göre CO ve CO <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.75$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	27
Şekil 4.22. Krank Açısına Göre CO ve CO <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.5$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	28
Şekil 4.23. Krank Açısına Göre CO ve CO <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.25$ , $T=250^{\circ}\text{C}$ ).....	28



Şekil 4.24. Krank Açısına Göre CO ve CO <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3$ , T=250°C).....	29
Şekil 4.25. Krank Açısına Göre OH ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=4.25$ , T=250°C) .....	31
Şekil 4.26. Krank Açısına Göre OH ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=4$ , T=250°C) .....	31
Şekil 4.27. Krank Açısına Göre OH ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.75$ , T=250°C) .....	32
Şekil 4.28. Krank Açısına Göre OH ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.5$ , T=250°C) .....	32
Şekil 4.29. Krank Açısına Göre OH ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.25$ , T=250°C) .....	33
Şekil 4.30. Krank Açısına Göre OH ve H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3$ , T=250°C) .....	33
Şekil 4.31. CO Emisyon (%).....	34
Şekil 4.32. CO <sub>2</sub> Emisyon (%).....	35
Şekil 4.33. O <sub>2</sub> Emisyon (%).....	35

## **TABLULAR LİSTESİ**

Tablo 3.1. Motor parametreleri .....	11
--------------------------------------	----

## ÖZET

Anahtar kelimeler: İçten Yanmalı Motorlar, Yanma Analizi, Chemkin-Pro

Bu çalışmada, homojen karışimli 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, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> 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.

# **MODELING OF HOMOGENOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION ENGINE WITH CHEMKIN-PRO**

## **SUMMARY**

Keywords: Internal Combustion Engine, Combustion Analyses, Chemkin-Pro

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, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> 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.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Petrolde elde edilen sıvı yakıtların sınırlı rezervlerine rağmen, dünyada otomotiv sektörü hızla gelişmektedir. Bu gelişmeye paralel olarak oto yakıtlarının tükenmesi ve çevre kirliliği gibi birçok sorun ortaya çıkmaktadır. Yakıt tüketiminin ve çevre kirliliğinin azaltılması silindirde gerçekleşen yanmanın verimli bir şekilde oluşumuna bağlıdır. Petrolde elde edilen sıvı yakıtların sınırlı rezervlerine rağmen, dünyada otomotiv sektörü hızla gelişmektedir. Bu gelişmeye paralel olarak oto yakıtlarının tükenmesi ve çevre kirliliği gibi birçok sorunlar ortaya çıkmaktadır. Yakıt tüketiminin ve çevre kirliliğinin azaltılması silindirde gerçekleşen yanmanın verimli bir şekilde oluşumuna bağlıdır. Bu sebeplerden dolayı silindir içi yanma verimini arttırmak adına yapılan birçok araştırma ve geliştirme çalışmaları günümüzde hızla devam etmektedir. Yapılan deneysel çalışmaların yanında sayısal modelleme ve bilgisayarlı analiz çalışmaları da gittikçe daha büyük önem kazanmaya başlamıştır. Gelişen yazılım ve bilgisayar teknolojisi sayesinde artık çok daha gerçeğe yakın olan analiz sonuçları deneysel çalışmaların yerini almaya başlamıştır. Motor oluşumlarının modellenmesi fizik ve kimyanın temel anlayışı olarak giderek genişlemekle birlikte geliştirilmeye devam edilmektedir. Bu yüzden bilgisayarla karmaşık denklemleri çözmek için yeni yazılımlar çıkmaktadır.

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 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. Bunun yanında farklı reaktör tiplerine göre de analiz yapabilmeye kabiliyeti bulunmaktadır. Bu reaktör tiplerinden biride sıfır boyutlu içten yanmalı motor reaktörüdür. Motor yanması için daha önce yapılan sıfır boyutlu çalışmalar ile yakıt tüketimi, EGR, giriş sıcaklığının ve farklı yakıtların homojen karışımli sıkıştırılmalı yanma (HCCI) motordaki yanmaya etkisi incelendiği bilinmektedir [3, 4, 5, 6, 7, 8].

HCCI, iyi bir şekilde karıştırılmış yakıt ve havanın kendiliğinden ateşlenme noktasına kadar sıkıştırıldığı bir içten yanma şeklidir. Hem homojen karışımli buji ateşlemeli ve hem de heterojen karışımli sıkıştırma ateşlemeli yanmanın iyi özelliklerini bir arada bulundurmaktadır. HCCI motorda buji ateşlemeli motorda olduğu gibi yakıt ile hava karıştırılmakta fakat buji ile ateşleme işlemi yerine sıkıştırma esnasındaki karışımın basınç ve sıcaklığının kendinden tutuşma noktasına çekilmesiyle tutuşma olayı kendiliğinden gerçekleşmektedir.

### **1.1. HCCI Motorların Gelişimi**

İçten yanmalı motor kavramı ilk olarak 1676 yılında Jean de Hautefeuille tarafından tasarlanmış, daha sonra Huygens ve Papin tarafından geliştirilmiştir [9]. 1860 yılında Jean Joseph Etienne Lenoir taşınabilir ve pratik içten yanmalı motoru icat etti. Kömür gazı yakan bu motorun verimi % 5'den daha düşüktü. Gücü ise 12 HP' ye kadar çıkabiliyordu.

1862 yılında Alphonse Beau de Rochas yanmalı motorlar için 4-stroklı sıkıştırma çevriminin patentini aldı. Bu patent daha sonra Otto tarafından kullanılmıştır. 1876 yılında Nicholas August Otto, Rochas çevrimiyle çalışan içten yanmalı motor üretmek için bir firma kurdu. 1892 yılında Dr. Rudolf Diesel, hava şarjının 24:1 oranına kadar sıkıştırılarak ateşlemenin yakıt püskürtülerek yapıldığı motor için patent aldı. Bu Carnot çevrimi tipindeki motor yüksek sıkıştırma oranına karşın, Otto motorlarına göre birkaç kat daha ağır ve pahalıydılar. İlk dizel motorlarının verimi ise % 28'di [10]. 1900 yılında yine Dr. Rudolf Diesel fıstık yağından elde edilen yakıt ile bir dizel motorun çalışmasını göstermiştir. Bu gösteri biyodizel yakıtın

kullanımının ilk örneği olarak tarihe geçmektedir [11]. 1925 yılına gelindiğinde İsveçli mühendis olan Jonas Hesselman ilk direk yakıt enjeksiyonlu kvılcım ateşlemeli motoru dünyaya tanıttı [12, 13]. 1957 yılında Felix Wankel, pratik dönel pistonlu Rochas çevrimine göre çalışan motor için patent aldı. Bu motorda mükemmel bir mekanik denge vardır ve boyutları ve ağırlığı % 70 daha azdır ancak verimi düşüktür [14].

HCCI motorlar yaklaşık 30 yıl önce farklı bir yanma fenomeni olarak tanımlandı. Konu hakkında modern çağda yapılan ilk çalışmalar Onishi ve diğerleri [15] daha sonradan ise Naguchi ve diğerleri [16] tarafından yapıldığı kabul edilmektedir. Bu araştırmalar ilk olarak yüksek miktarda atık gaz bırakan iki zamanlı benzinli bir motora uygulanmış ve HCCI motorun temel karakteristiği olan küçük bir alev yayılımıyla yanmanın eş zamanlı olarak birçok noktada oluştuğu anlaşılmıştır. 1983 yılında Najt ve Foster [17] ilk defa dört zamanlı benzinli bir motorda HCCI denemesi yapmışlardır. Bu çalışmada HCCI' in kimyasal kinetik ile ihmal edilen türbülans ve karışım tarafından kontrol edildiği anlaşılmış. 1989 yılında ise Thring [18] EGR, yakıt/hava ve sıkıştırma oranının HCCI yanma ve egzoz emisyon üzerine etkilerini incelemiştir.

90'lı yıllarda HCCI yanma mekanizması üzerine çok farklı çalışma koşulları altında yapılan çalışmalara olan ilgi devam etmiştir. Bu ilgi yanma verimi ve performansı ve bu sayede elde edilecek düşük egzoz emisyonu eldesi üzerine gerekli olan motivasyonu sağlamıştır.

HCCI, benzinli ve dizel motorların avantajlarını tek bir üniteye buluşturan yeni bir motor teknolojisidir. Çeşitli firmalar üzerinde çalışmaktadır. HCCI motor yakıt olarak benzin kullanır. Normal benzinli motorlardaki gibi bujileri bulunur fakat bu bujiler her devirde çakmaz. Sabit hızda ve yüksek hız gerektirmeyen düşük devirli sürüşlerde yakıt aynı dizel motorlardaki gibi sadece sıkıştırılarak patlatılır. Ani hızlanma gibi durumlarda ise bu işleme bujiler yardımcı olur. HCCI motorlarda karışım genellikle fakir olduğundan ortalama maksimum basınç buji ateşlemeli motorlara göre oldukça düşük olmaktadır. Bunun sonucu olarak HCCI motorlar çok

düşük azot oksit emisyonlarına ( $NO_x$ ), yüksek verim ve ihmal edilebilir ölçüde partikül madde emisyonlarına sahiptirler.

Bütün modeller motor verimi, performansını ve emisyonlarını hesaplamak için kullanılırlar. Sıfır boyutlu ve sanki boyutlu modeller tam motor modellerini içerirler, fakat yanma odası geometrisiyle açık bir bağlantı yoktur. Dolayısıyla, bu modeller motor geliştirmeyle ilgili parametrik çalışmalarda kullanışlıdır. Yanma odası geometrisi önemli veya çokça değiştirilmesi gerekiyorsa, çok boyutlu modeller daha çok kullanılmaktadır.

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 değerleri ile kıyaslanmıştır. Deneysel olarak elde edilen CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> 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.



## BÖLÜM 2. MODELLEME VE YÖNTEMLER

Yanma modellerinde kullanılan üç yaklaşım vardır:

- (1) Sıfır boyutlu modeller: Bu modeller ampirik 'ısının açığa çıkması' modeli kullanılırlar; burada tek bağımsız değişken zamandır.
- (2) Bir boyutlu modeller: Bu modeller 'ısının açığa çıkması' modelini türeterek türbülanslı yanma için ayrı birer alt model kullanırlar.
- (3) Çok boyutlu modeller: Bu modeller alev ilerlemesini hesaplamak için üç boyutlu kütle, momentum, enerji ve bileşenlerin korunumu denklemlerini sayısal olarak çözerler.

### 2.1. Sıfır Boyutlu Yanma Modelleri

Bu yanma modeli üç bölgenin kullanılmasıyla yapılır. Bu bölgelerin ikisi yanmış gaz içerir. Bu bölgeler;

- (i) Yanmamış gaz
  - (ii) Yanmış gaz
  - (iii) Yanma odasının cidarındaki yanmış gaz – ısı sınır tabaka veya soğutma tabakası
- Bu yapı Şekil 1'de gösterilmiştir. Yanma bölgesi veya alev cephesi yanmış ve yanmamış gazları ayırmaktadır. Yanma Wiebe fonksiyonu ile modellenir. (Denklem 2.1)

$$X_{\theta} = 1 - \exp -a (\theta - \theta_0) / \Delta\theta_b)^{m+1} \quad (2.1)$$

Burada,

- X : Yanmış kütle miktarı  
 $\theta_0$  : Yanmanın başladığı krank mili açısı  
 $\Delta\theta_b$  : Yanma süresi  
a ve m değişebilen katsayılarıdır.

Gazdan duvarlara doğru ısı transferi ise; (Denklem 2.2)

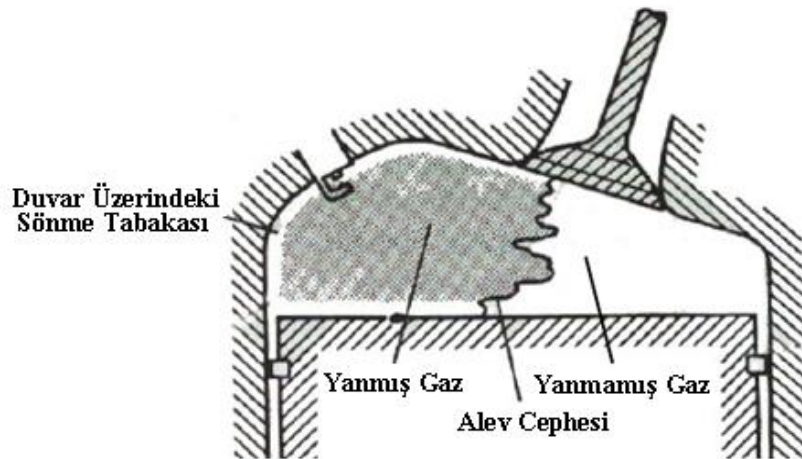
$$Q = h_g A_h T_g - T_{w-h} + A_p T_g - T_{w-p} + A_1 T_g - T_{w-1} \quad (2.2)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Formülde,  $A_h$  silindir üstü alanı,  $T_{w-h}$  silindir üstü sıcaklığı,  $T_g$  gaz sıcaklığı,  $A_p$  piston üst yüzeyi alanı,  $T_{w-p}$  piston yüzeyi sıcaklığı,  $A_1$  silindir yan yüzeyi alanı,  $T_{w-1}$  Silindir yan yüzeyi sıcaklığı. Ayrıca  $h_g$  ısı transfer katsayısı olup Woschni tarafından geliştirilen aşağıdaki ampirik bağıntı kullanılarak hesaplanabilmektedir [19]. (Denklem 2.3)

$$h_g t = a_g B^{-0.2} P t^{0.8} T t^{-0.55} v t^{0.8} \quad (2.3)$$

Burada  $h_g$  ısı taşınım katsayısını, B silindir çapını, P silindir basıncını, T silindir sıcaklığını, v silindir içindeki gazların ortalama hızını göstermektedir.

Bu model motor verimi ve motordan kaynaklanan kirletici emisyonları hesaplamak için kullanılır. Yanmış gazdaki karbon-oksijen-hidrojen konsantrasyonları denge termodinamiği kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 2.1. Silindir içerisinde yanma sırasında yanmış ve yanmamış karışımların gösterilmesi.

Yanma modellerinde kullanılan üç yöntem vardır:

- (1) Fiziksel Modelleme
- (2) Matematiksel Modelleme
- (3) Kimyasal Kinetik Modelleme

## 2.2. Kimyasal Kinetik Model

Motorlarda kendiliğinden tutuşmanın modellenmesi için kimyasal kinetik hakkında detaylı bilginin elde bulunması gereklidir. Son yıllarda kimyasal kinetik model içten yanmalı motorlarda yanma analizi için çok önemli bir olgu haline gelmiştir.

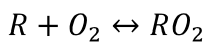
Genel olarak reaksiyon mekanizması giren yakıt ve oksitleyicilerin son ürüne kadar olan ve yanma olayından sonra oluşan tüm kimyasal ürünleri içeren dönüşümün temel adımlarını içerir. Bu durum kimyasal bileşiklerin konsantrasyonlarının kombinasyonlarını ve reaksiyon ısısına bağlı enerji denklemlerini elde etmemizi sağlamaktadır [20].

Yanma ortamında temel yakıtlar hidrokarbonlardır. Yanan hidrokarbonların kimyasal kinetik modelleri çok karışıktır. Yüzlerce alt reaksiyon içeren ve birçok kimyasal bileşiğin temel kimyasal mekanizma bilgisi ile bu şemalar sürekli gelişmektedir.

Hidrokarbon yanması zincirleme prosesi tarafından kontrol edilir. Altta görülen reaksiyon yüksek sıcaklıkta öncelikli zincirleme prosesini sağlamaktadır.



Farklı şekilde bozulma zincir reaksiyonunun düşük sıcaklıktaki hidrokarbon yanmasını şematik olarak aşağıda görebiliriz.

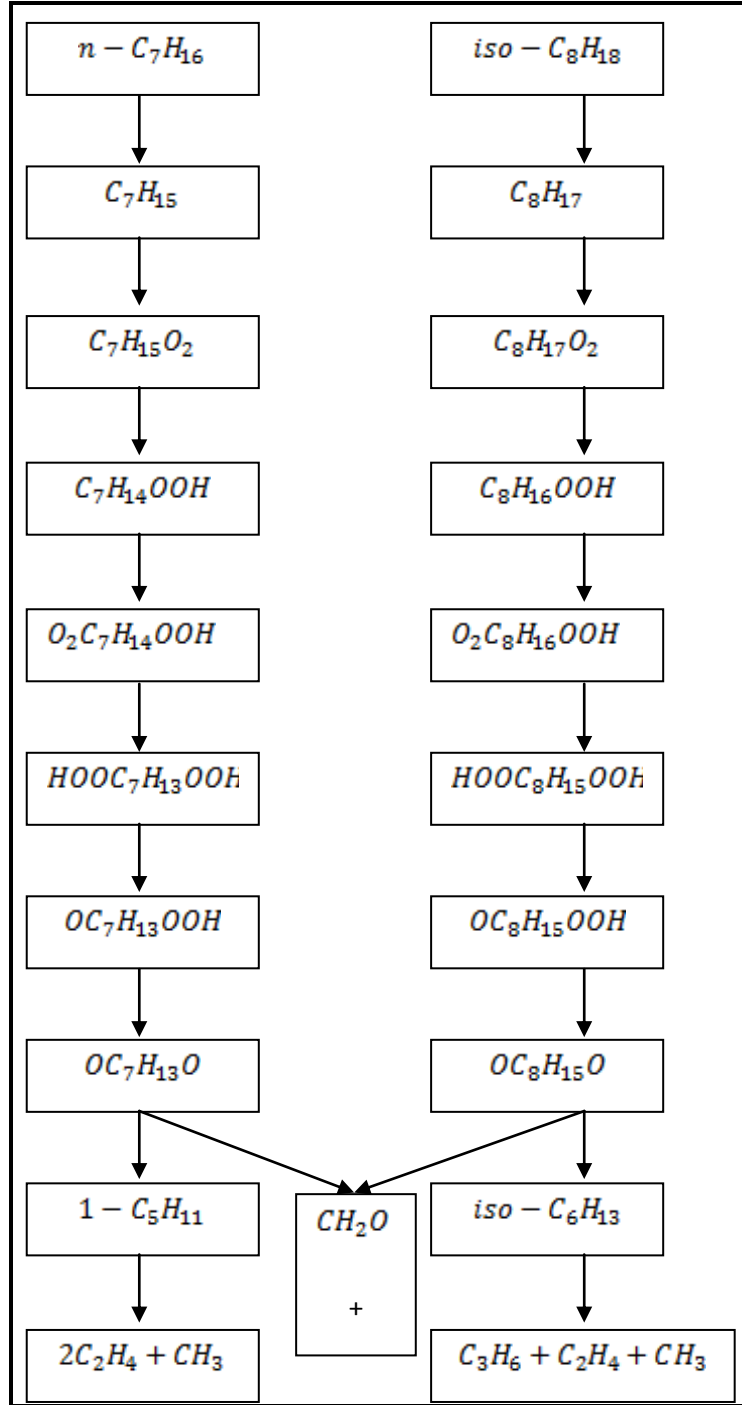


Bu denklemde R bir alkali radikaldir. Ürün olan  $RO_2$  radikali ise H atomunu doğrudan çıkarabilmektedir [21].

Hidrokarbon yakıtının yanmasındaki tüm bu yanma prosesi yakıt ve oksitleyicinin su ve karbondioksit dönüşümünden ibarettir [22]. Öncelikle yakıt küçük parçalara ayrılır. Daha sonra ise orta ölçekli ürünler sırayla tükenerek son ürünleri oluşturur. Hidrokarbon yakıtların bu önemli yanmanın alt mekanizması hakkında ayrıntılı bilgiye Westbrook ve Dryer'ın [23] derlemesinden ulaşılabilir.

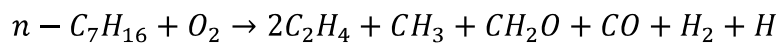
Hidrokarbon yanma prosesindeki kimyasal reaksiyonlar sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişiklik gösterebilirler [24]. Reaksiyon sırası yaklaşık olarak 1000 K sıcaklığının altında ise “düşük sıcaklık mekanizması” 1000 K'nin üstünde ise “yüksek sıcaklık mekanizması” olarak adlandırılır [25, 26].

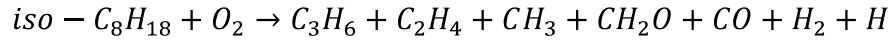
N-heptan için ayrıntılı mekanizma Chevalier [27] ( $C_1$ - $C_4$  kinetiği) ve Müller [28] ( $C_3$ - $C_8$  kinetiği) elde etmiştir (75 durum ve 510 reaksiyon). Yakıtın oktan sayısı araştırmada akış reaktör oranı olarak tanımlanır ve kod azaltma sürecinde bir girdi parametresi olarak kullanılır. Şekil 2 de n-heptan ve izo-oktan için düşük sıcaklık oksidasyon kimyası şemasını gösterilmektedir [29].



Şekil 2.2. n-heptan ve izo-oktan'ın düşük sıcaklıkta kimyasal oksidasyonunun şematik diyagramı

izo-oktan ve n-heptanın düşük sıcaklık oksidasyonu için global reaksiyonu aşağıda verilmiştir:





Oksidasyon mekanizmalarındaki fark n-heptan için  $C_2H_4$  üretimi varken izo-oktan için  $C_3H_6$  üretimi göze çarpmaktadır.

İzo-oktan ve n-heptan için vuruntu karakteristiği çeşitli deneysel çalışmalar sayesinde çok iyi bilinmektedir [30]. İzo-oktan ve kendiliğinden tutuşmasına dair yaygın olarak bilinen deneysel bulgular Fieweger ve diğerleri tarafından elde edilmiştir [31].

## BÖLÜM 3. CHEMKIN-PRO İLE MODELLEME ÇALIŞMASI

### 3.1. Model Parametreleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan veriler İngiltere’de bulunan Shell laboratuvarında özel olarak tasarlanan tek silindirli, 4 valfli, eğimli çatılı silindir kafasına sahip deneysel Ricardo Hydra motorunda yapılan çalışmalardan alınmıştır. Motor özellikleri Tablo 1 de ayrıntılı olarak verilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan PRF yakıtı %85 iso-oktan ve %15 n-heptan (PRF-85) karışımından oluşmaktadır.

Tablo 3.1. Motor parametreleri

Parametre	Value	Unit
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 (EVC)	332 ÜÖNS	KMA

### 3.2. Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi ve Çözümüne Başlama

Deneysel kurulumda HCCI şartlarını yakalayabilmek için piston tepesini yükselterek sıkıştırma oranı 14.04 değerine getirilmiş ve silindir içine giriş sıcaklık değeri ise 250 °C' ye yükseltmiştir. Yapılan deneysel çalışmada emme manifoldundan silindir içine giren havanın basıncı 1 bar ve hava fazlalık katsayısı ise 4.25, 4, 3.75, 3.5, 3.25, 3 olacak şekilde ön karışım odasında hava yakıt karışımları hazırlanmıştır.

Modelleme çalışması için 2 farklı analiz yapılmıştır. Yapılan analizler temel olarak iki grup altında toplanmıştır. 1. Gruptaki analizler indirgenmiş kimyasal 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 [32]. Analizler için kullanılan kimyasal kinetik mekanizmalardan indirgenmiş olanı Tsurushima [33] tarafından geliştirilen, 33 bileşen ve 38 reaksiyondan oluşan kimyasal mekanizmadır. Detaylı kimyasal mekanizma ise Westbrook ve ark. [34] tarafından geliştirilen 1550 bileşen ve 6000 reaksiyon içeren mekanizmadır ve literatürde PRF yakıtı için referans mekanizma olarak kullanılmaktadır.

Giriş basıncı deneysel verilerden alınarak programa 1.33 bar değerinde girilmiştir. Analizin ısı transferi kısmında ise Nusselt, (Denklem 2.4)

$$Nu = a \times Re^b \times Pr^c \quad (2.4)$$

Denklemden yararlanarak çözüm yapılmaktadır. Daha önce yapılmış çalışmalara bakılarak HCCI motor için bu değerler  $a = 0.035$ ,  $b = 0.71$ ,  $c = 0$  seçilmiştir [35]. Silindir duvar sıcaklığı ise 430 K seçilmiştir. Chemkin-Pro yazılımı cidar ısı transferi için Woschni denklemini kullanmaktadır. (Denklem 2.5)

$$v = c_1 \times S_p + c_2 \frac{V_d \times T_r}{P_r \times V_r} \times (p - p_m) \quad (2.5)$$

Woschni denklemine bakıldığında denklemdeki sabit değerler yine HCCI motor için literatürden  $c_1 = 2.28$ ,  $c_{12} = 0.308$ ,  $c_2 = 3.24$  seçilmiştir [36].



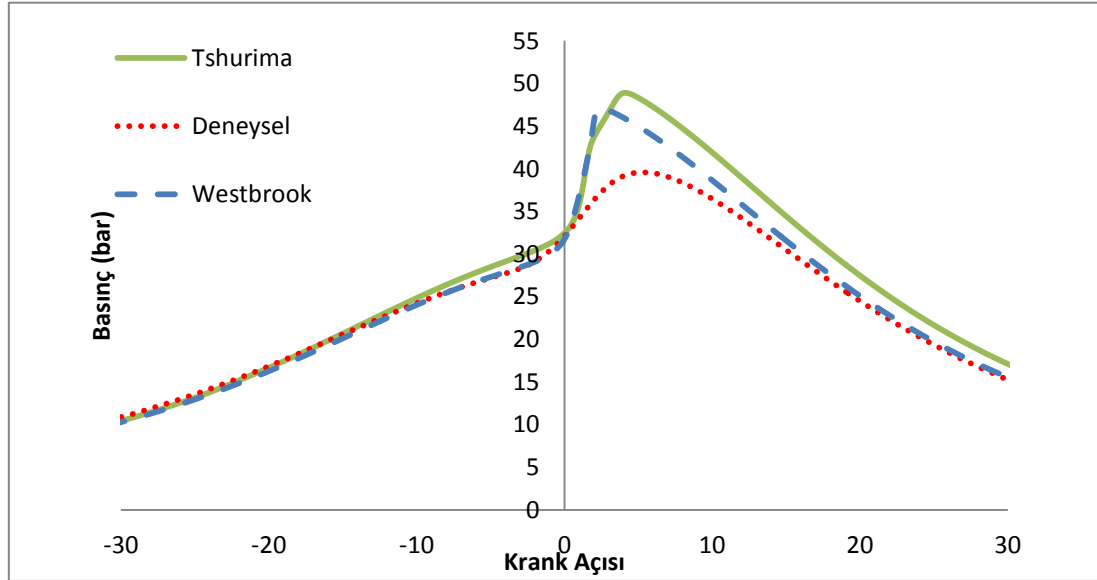
### 3.3. Analiz Sonuçlarının Alınması

Yapılan analizler sonucunda sayısal değerler elde edilmiştir. Sayısal değerler indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma, detaylı kimyasal kinetik mekanizma ve deneysel verilerle grafikler üzerinde mukayese edilmiştir. Modelleme ve analizler sonucunda basınç ve yanma sonucunda oluşan gazların emisyon değerleri deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Deneysel olarak elde edemediğimiz sıcaklık ve yakıt değerleri için kimyasal kinetik mekanizmalar arasında kıyaslama yapılmıştır.

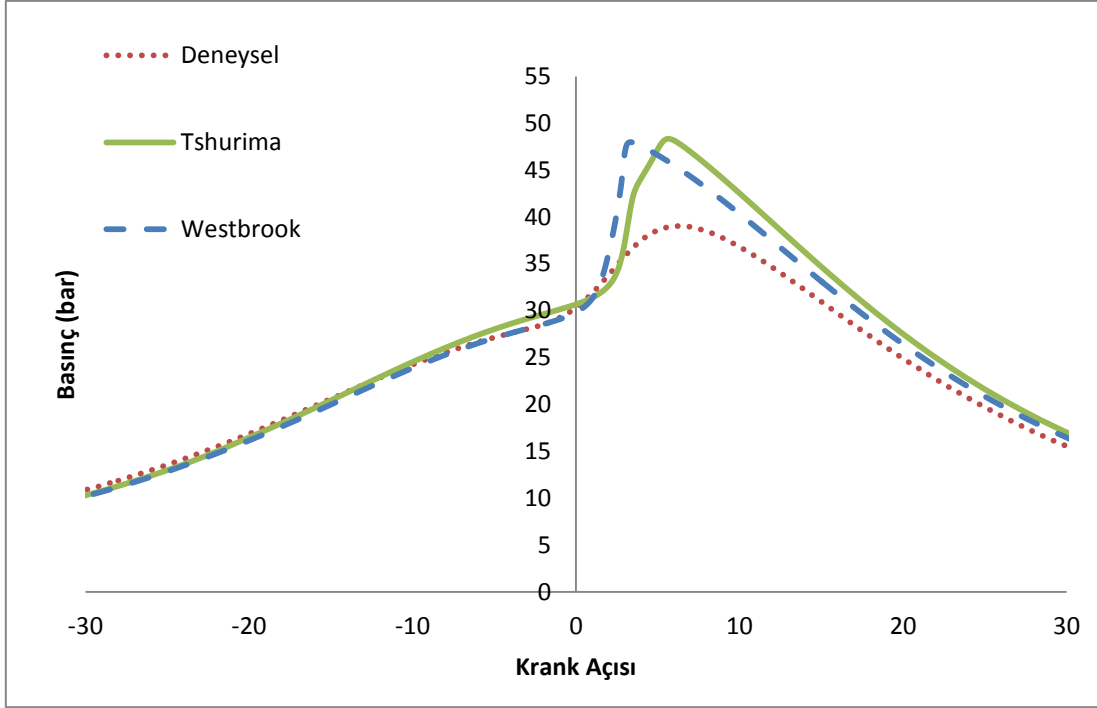
## BÖLÜM 4. ANALİZ SONUCU GRAFİKLER

### 4.1. Basınç Grafikleri

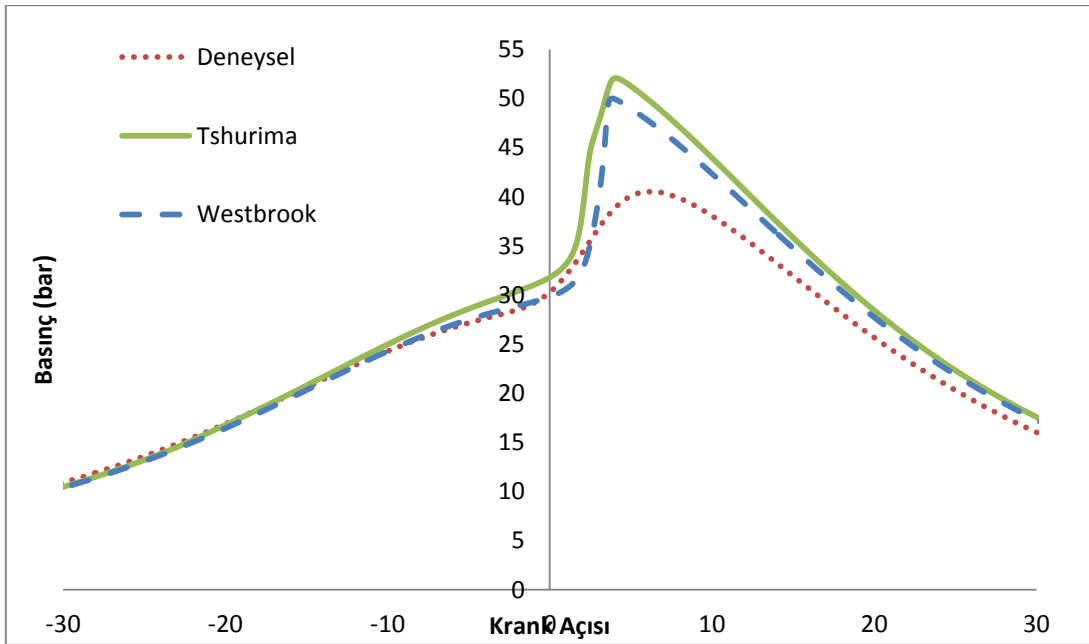
Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler basınç-krank açısı grafiklerinde gösterilmiştir. Değişik hava fazlalık katsayısı değerleri için Tshurima ve Westbrook kimyasal kinetik modellerinin deneysel sonuçlara göre kıyaslanması görülmektedir. Grafiklerden de görüleceği üzere deneysel verilere göre daha hızlı basınç artışları yaşanmaktadır. Chemkin-Pro programında detaylı piston modellemesi olmadığı için 3 boyutlu programlara göre kötü sonuçlar vermiştir. Yüzdesele olarak ifade edilecek olursa %18 mertebesinde bir yanılma payı gözlenmektedir. İki mekanizma arasında bir kıyaslama yapılacak olursa, indirgenmiş kimyasal mekanizma detaylı kimyasal mekanizmaya göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Deneysel sonuçlara daha yakındır.



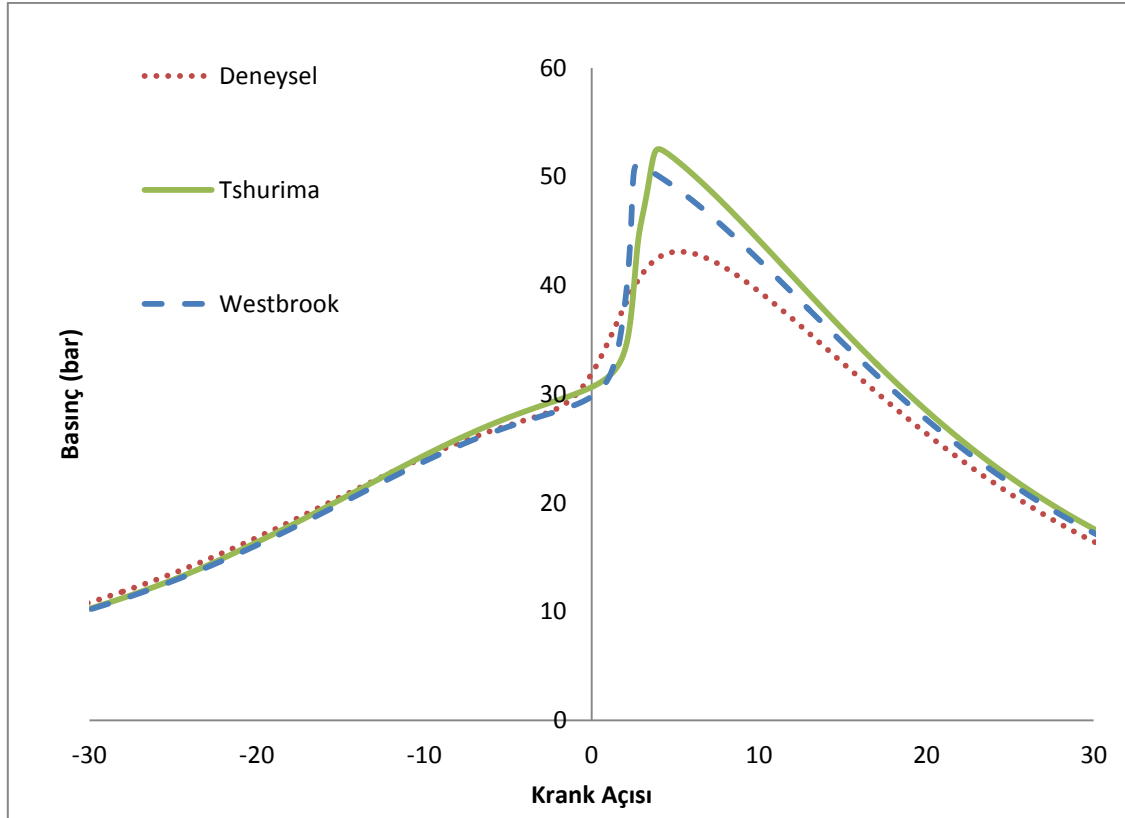
Şekil 4.1. Silindir Basıncının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4.25$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



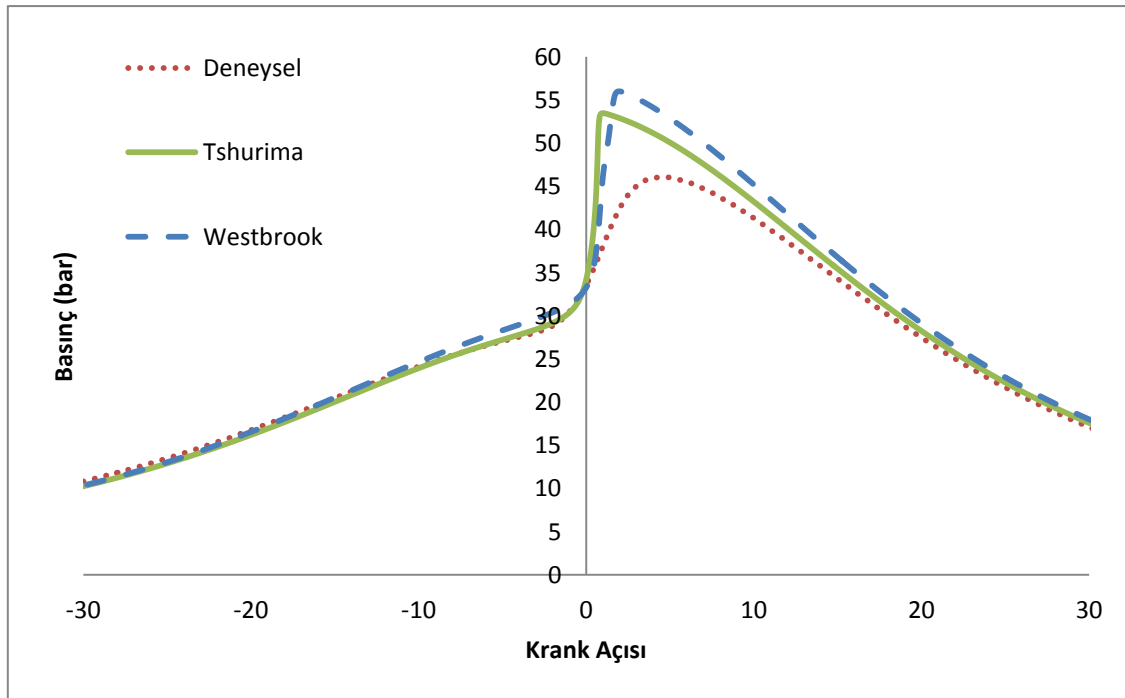
Şekil 4.2. Silindir Basmaçının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



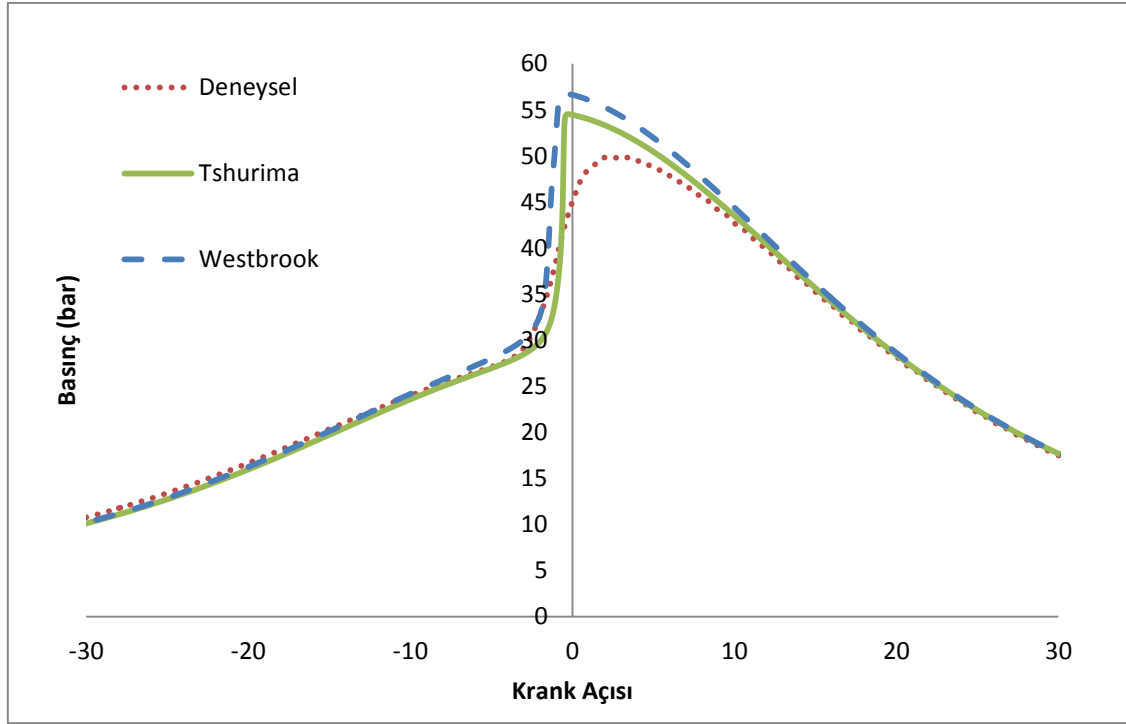
Şekil 4.3. Silindir Basmaçının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.75$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



Şekil 4.4. Silindir Basmaçının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.5$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



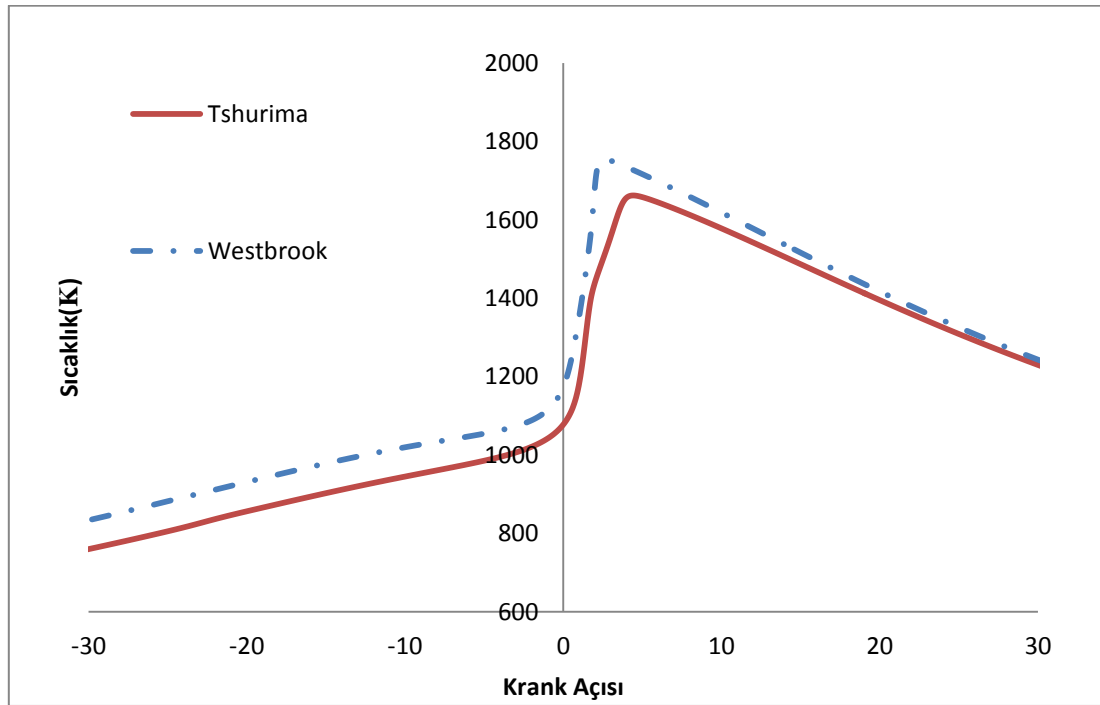
Şekil 4.5. Silindir Basmaçının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.25$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



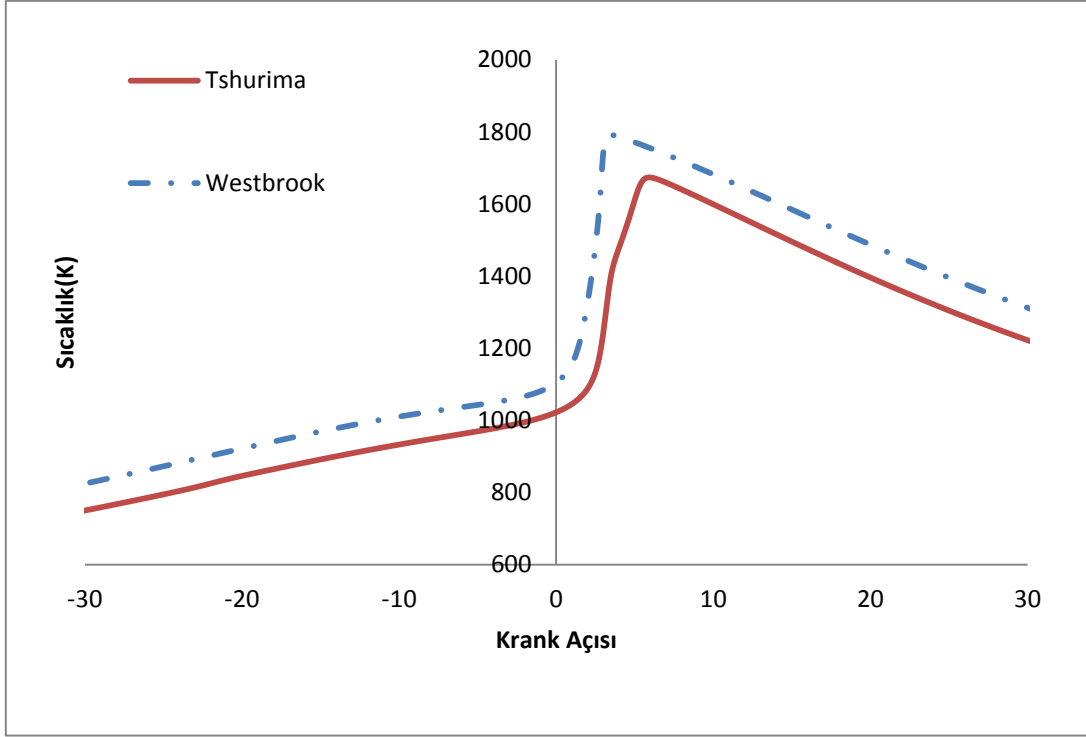
Şekil 4.6. Silindir Basıncının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3$ ,  $T=250^{\circ}\text{C}$ )

## 4.2. Sıcaklık Grafikleri

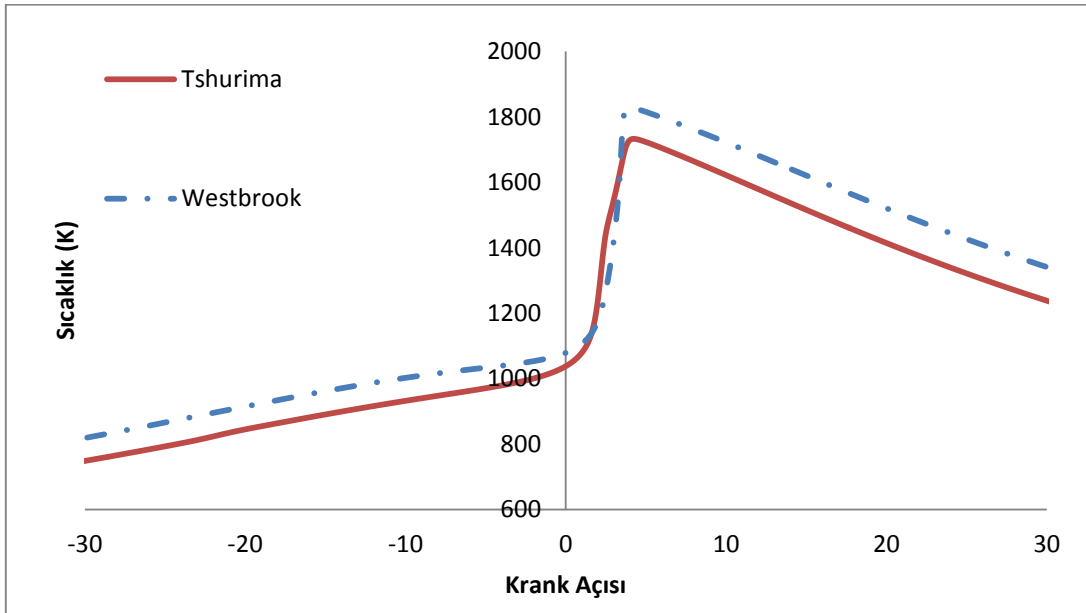
Yapılan analizler sonucu detaylı ve indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizmalar için elde edilen sıcaklık değerleri sıcaklık-krank açısı grafiklerinde gösterilmiştir. Deneysel sıcaklık değerleri elimizde olmadığından dolayı doğrulama işlemi yapılamamıştır. Kimyasal mekanizmalar arasında bir kıyaslama yapılabilmektedir. Değişik hava fazlalık katsayısı değerleri için Tshurima ve Westbrook mekanizmalarının sıcaklık eğrilerine bakıldığında yanma anındaki ani sıcaklık artışları göze çarpmaktadır. Maksimum sıcaklığın 2000 K mertebesinde olduğu görülmektedir. Detaylı kimyasal kinetik mekanizmanın indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizmaya göre daha yüksek sıcaklıklara ulaştığı grafiklerden görülmektedir.



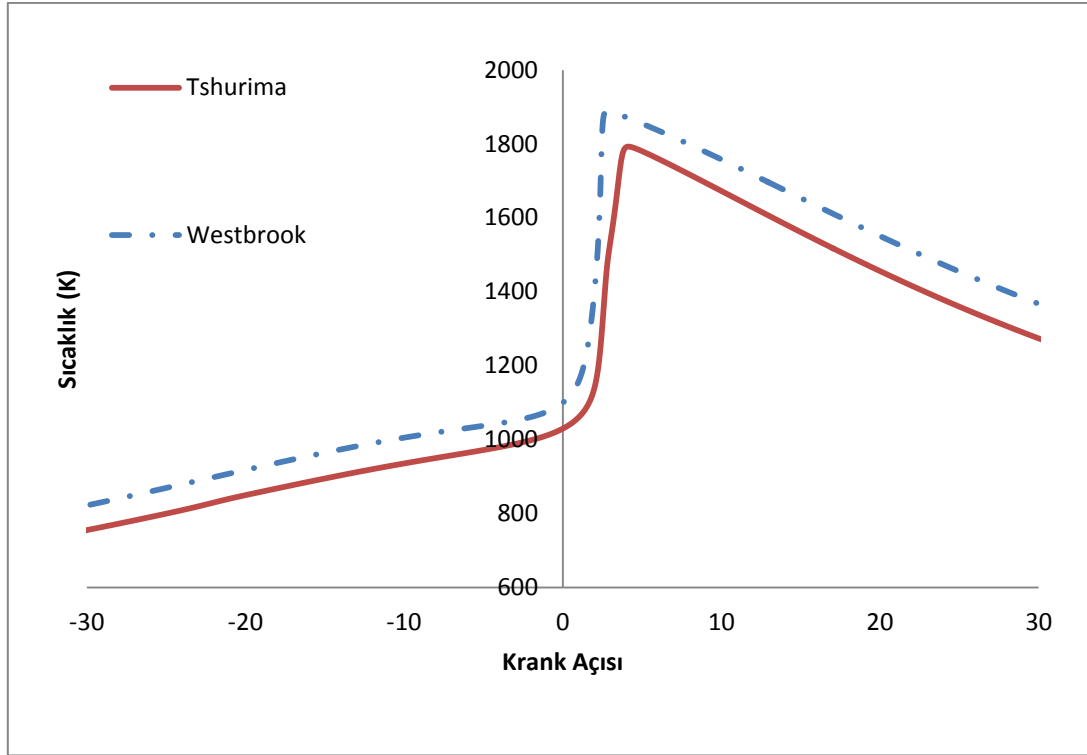
Şekil 4.7. Silindir Sıcaklığının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4.25$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



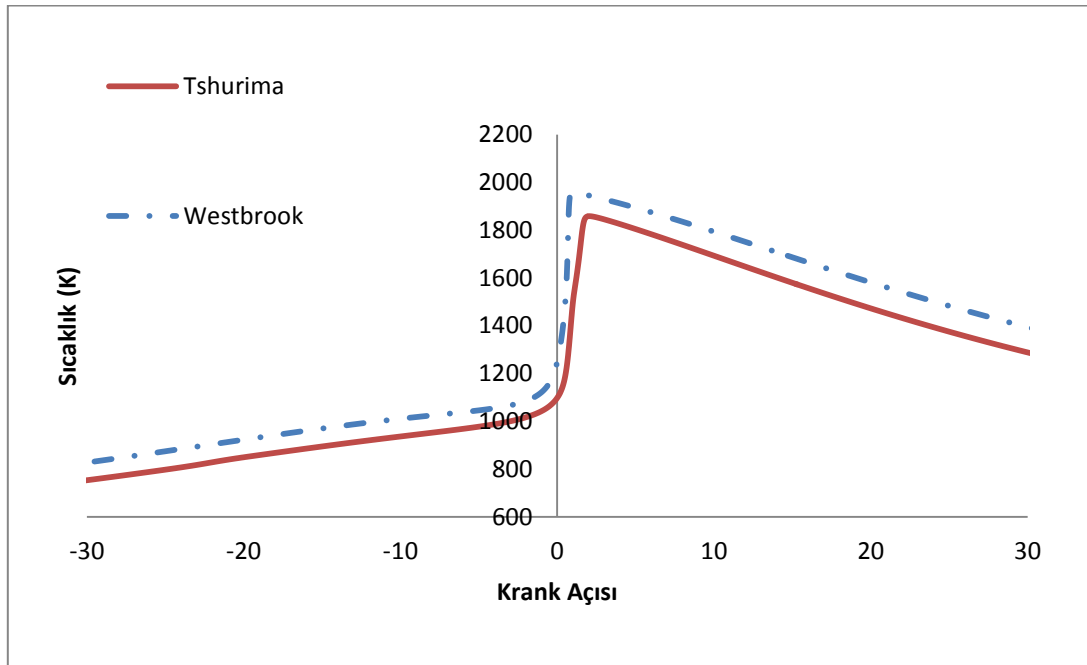
Şekil 4.8. Silindir Sıcaklığının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



Şekil 4.9. Silindir Sıcaklığının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.75$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )

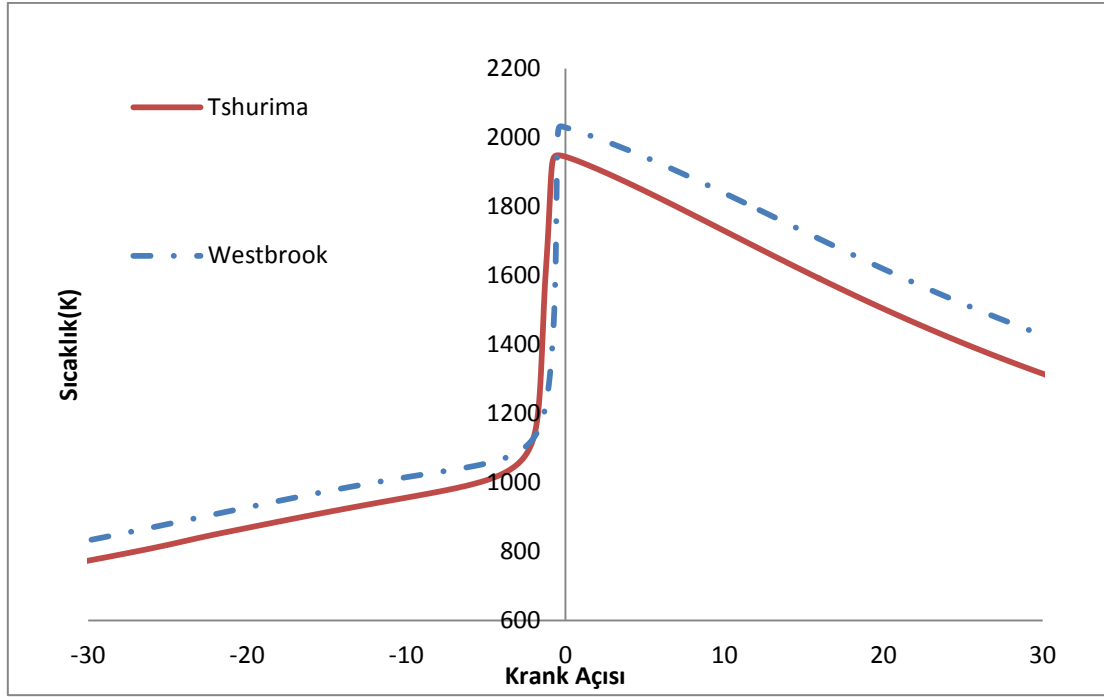


Şekil 4.10. Silindir Sıcaklığının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.5$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



Şekil 4.11. Silindir Sıcaklığının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.25$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )

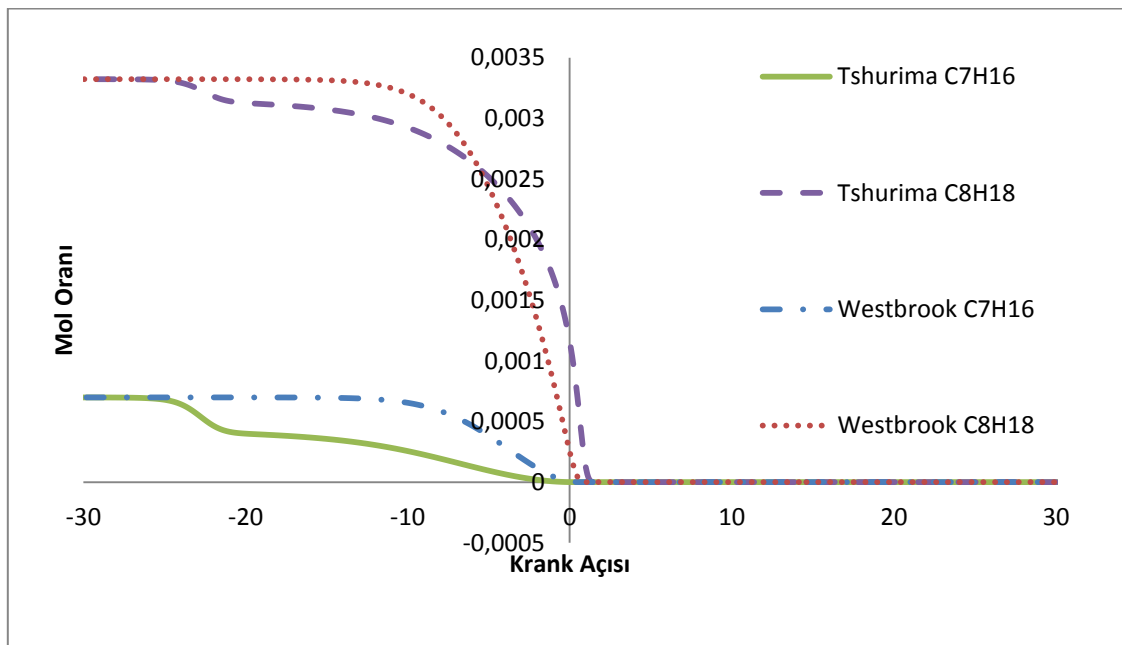




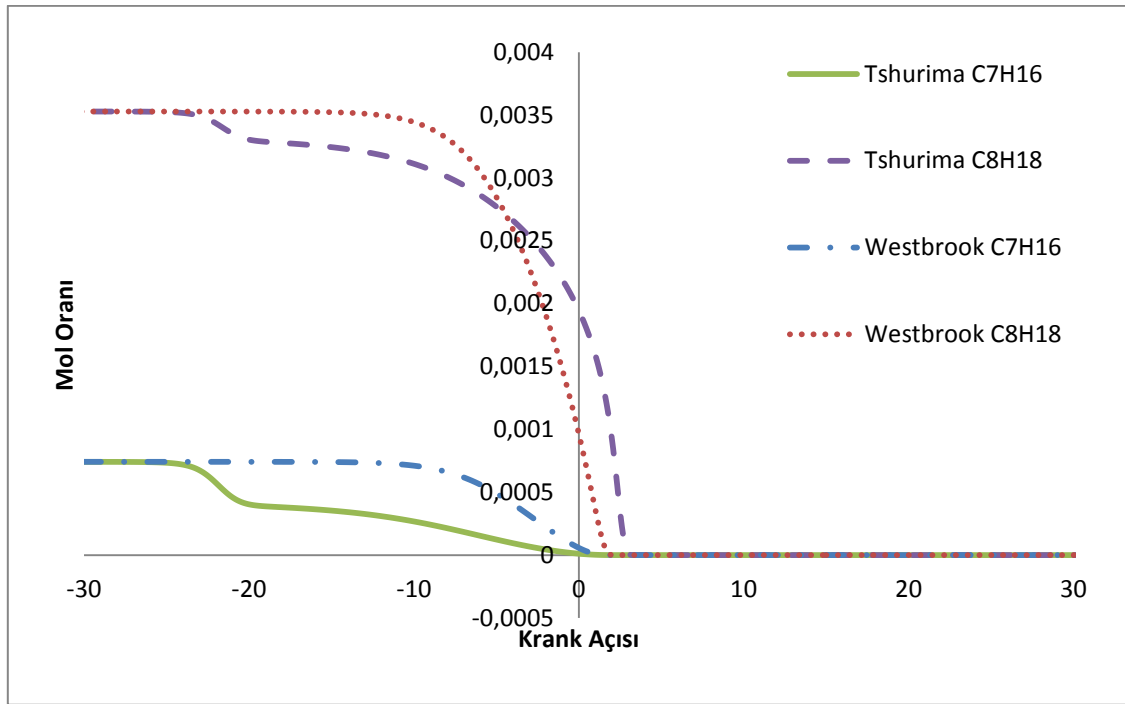
Şekil 4.12. Silindir Sıcaklığının Krank Mili Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )

### 4.3. Yakıt Grafikleri

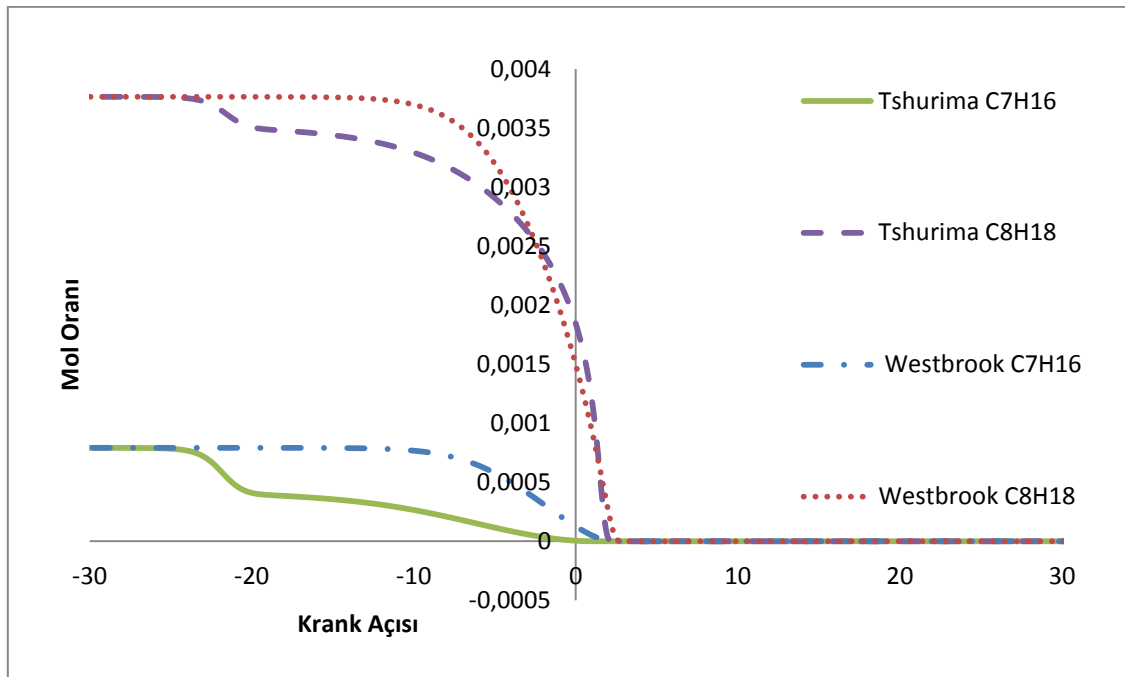
Analiz sonucunda elde edilen yakıt grafiklerine genel olarak bakıldığında yakıtın kütleli olarak %15'i olan heptan ( $C_7H_{16}$ ) bileşeninin krank açısına bağlı olarak tüketimi indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma olan Tshurima mekanizmasında daha erken başlamıştır. Başlangıçta 0,001 mol oranında 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 oktan ( $C_8H_{18}$ ) bileşeninin krank açısına bağlı olarak tüketiminde ise indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma olan Tshurima 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. Tshurima mekanizma değerleri için yakıt daha erken yanmaya başlamış ve daha geç tükenmiştir.



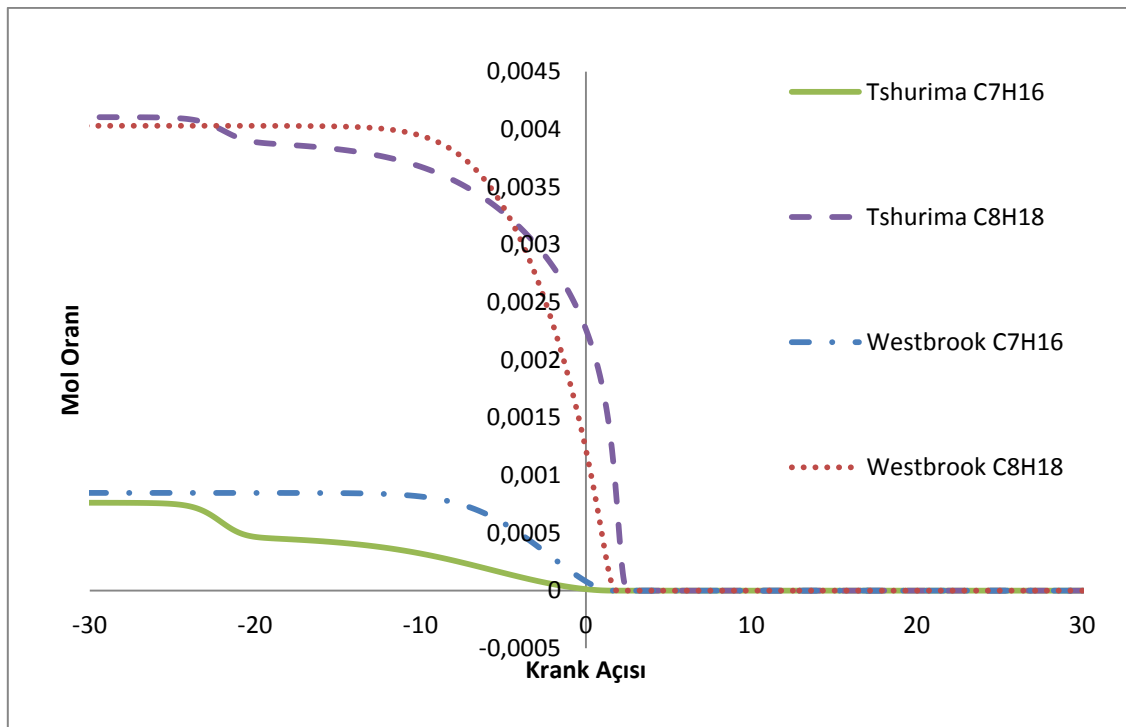
Şekil 4.13. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4.25$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



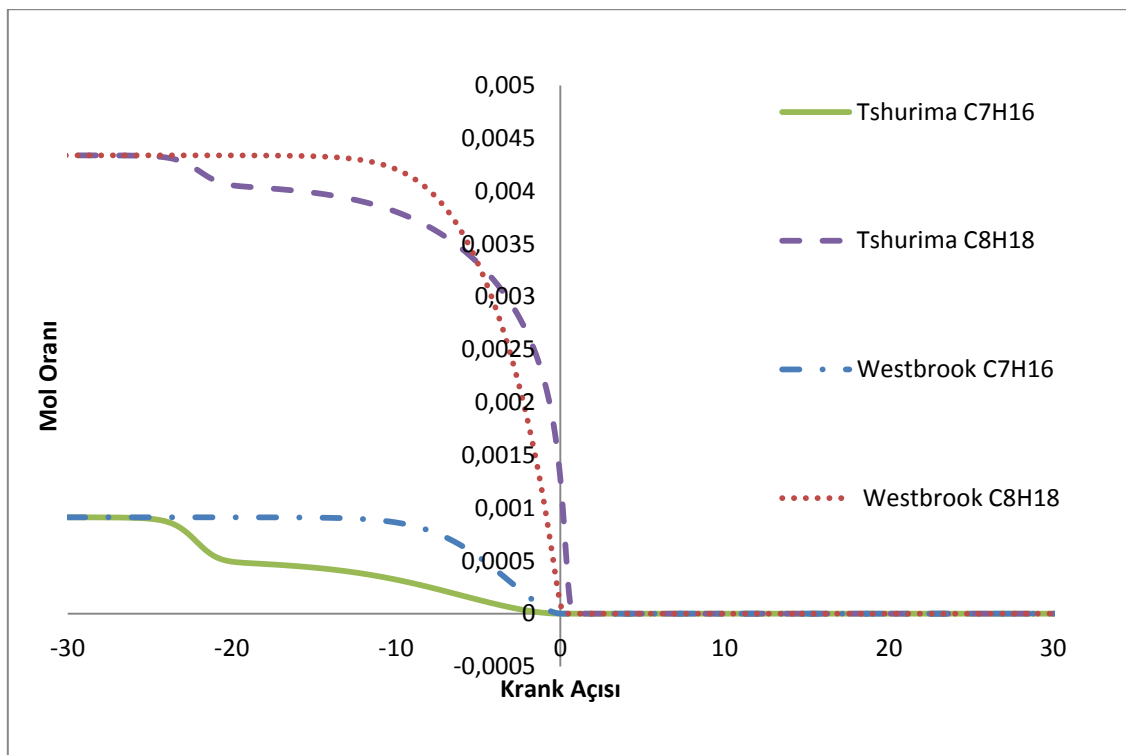
Şekil 4.14. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=4$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



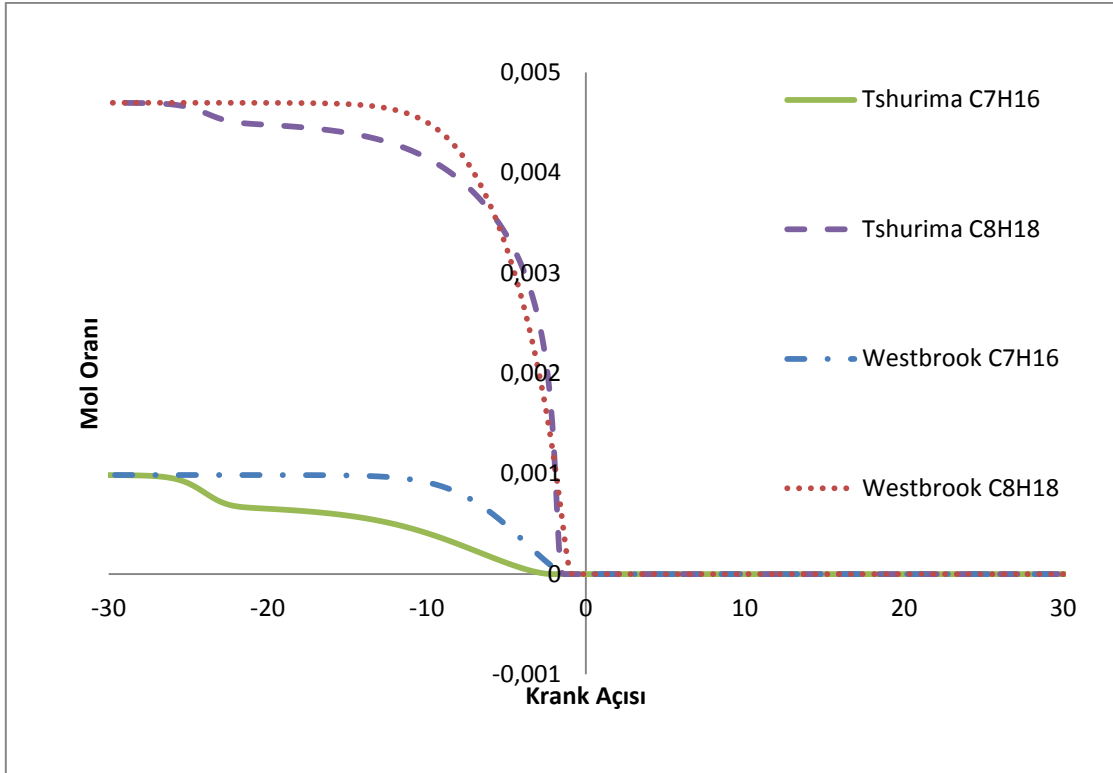
Şekil 4.15. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.75$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



Şekil 4.16. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.5$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



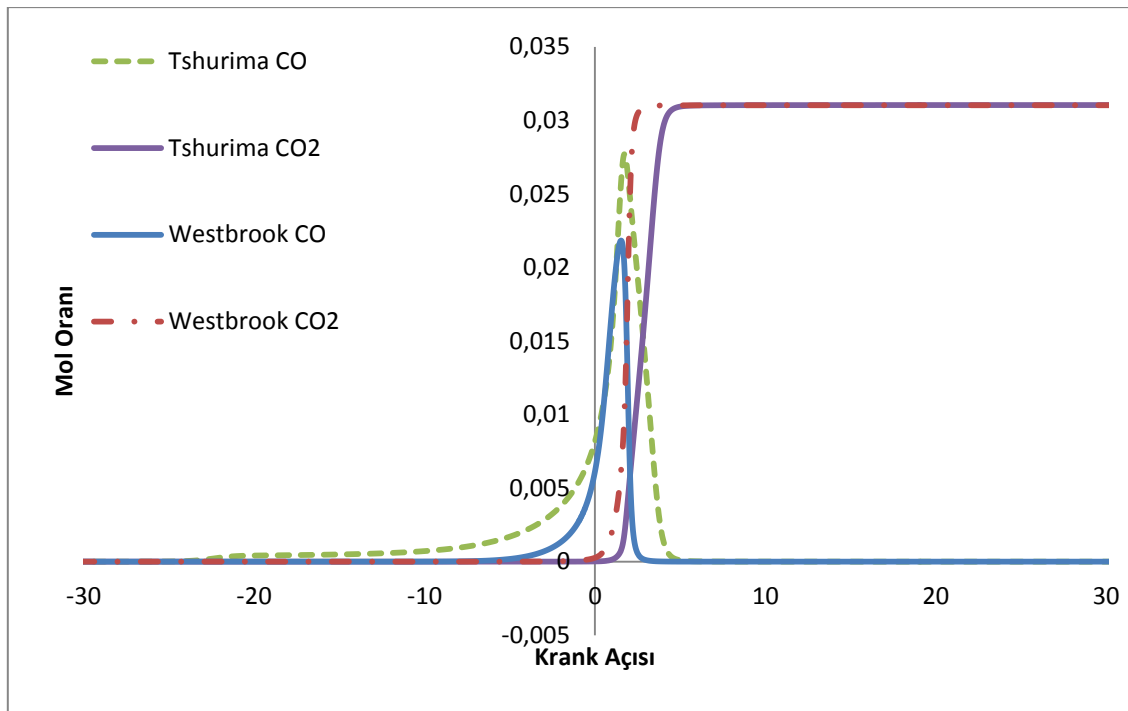
Şekil 4.17. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3.25$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



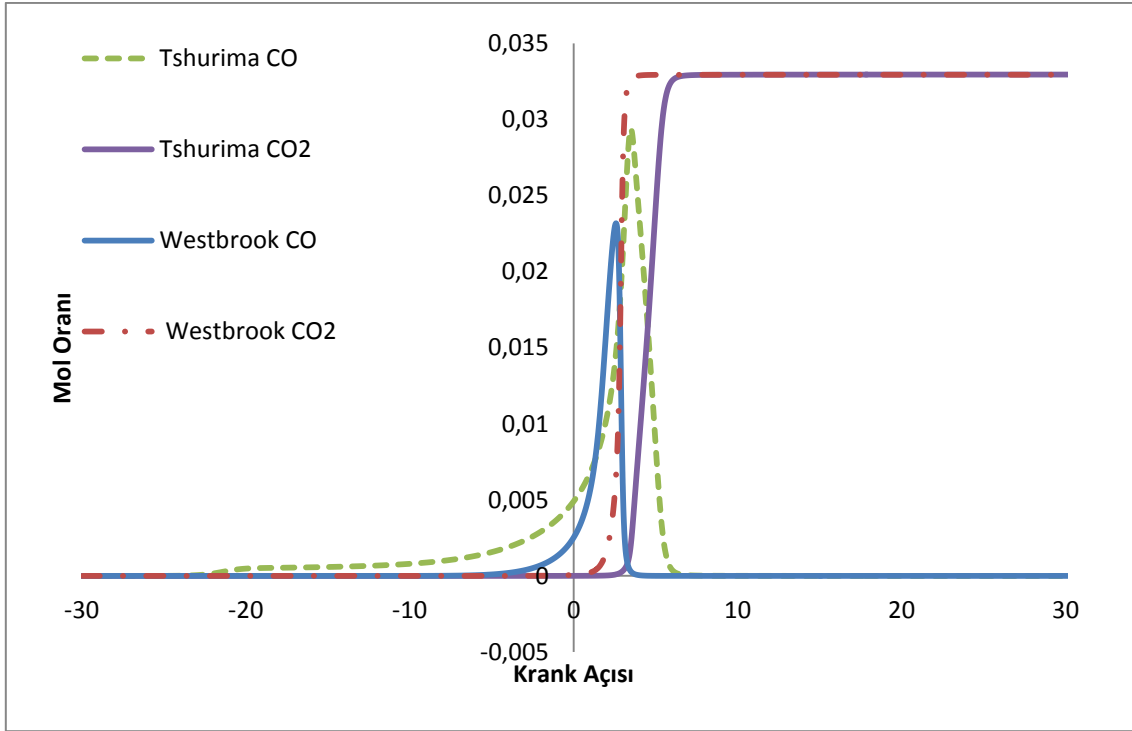
Şekil 4.18. Yakıt Miktarlarının Krank Açısına Göre Değişimi ( $\lambda=3$ ,  $T=250^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.4. CO ve CO<sub>2</sub> Grafikleri

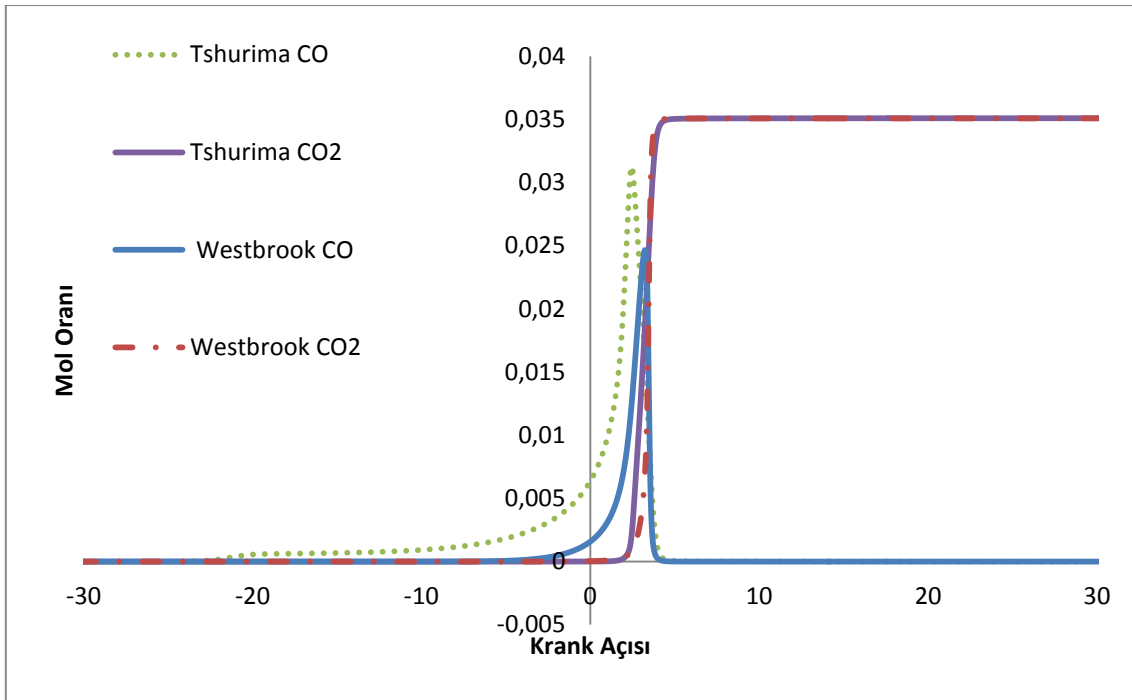
Yapılan analizler sonucunda elde edilen verilerle karbonmonoksit ve karbondioksit oluşumunun krank açısına göre durumu incelenmiştir. Detaylı kimyasal kinetik mekanizma değerleri için CO grafiklerinde krank açısı -5 değerindeyken artmaya başlamıştır. 2 değerinde ise maksimum noktaya ulaşmıştır. Daha sonra krank açısı 3 değerindeyken tükendiği görülmektedir. Detaylı kimyasal mekanizma değerleri için CO<sub>2</sub> 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 -20 değerindeyken yükselmeye başlamıştır. Krank açısı 2 değerindeyken maksimum noktaya ulaşmış ve sonrasında sıfırlanmıştır. Yine indirgenmiş kimyasal mekanizma için CO<sub>2</sub> grafiklerinde 2 krank açısında yükselmeye başlamıştır. Ani bir yükselişle 4 krank açısında maksimum seviyeye yükselmiş ve sabitlenmiştir. Genel olarak grafiklerden anlaşılacağı üzere Chemkin programında yanmanın çok hızlı gerçekleştiği görülmektedir. CO<sub>2</sub> değerinin sabitlendiği krank açısı yanmanın sonlandığı bilgisini de vermektedir.



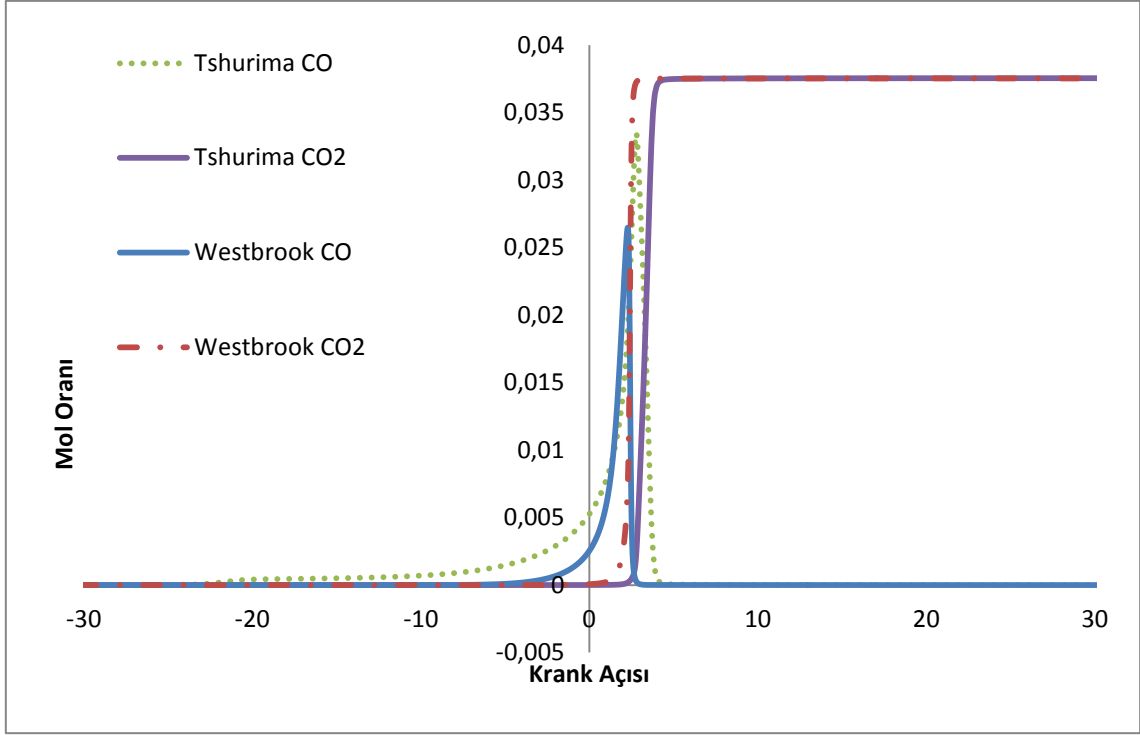
Şekil 4.19. Krank Açısına Göre CO ve CO<sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=4.25$ ,  $T=250^{\circ}\text{C}$ )



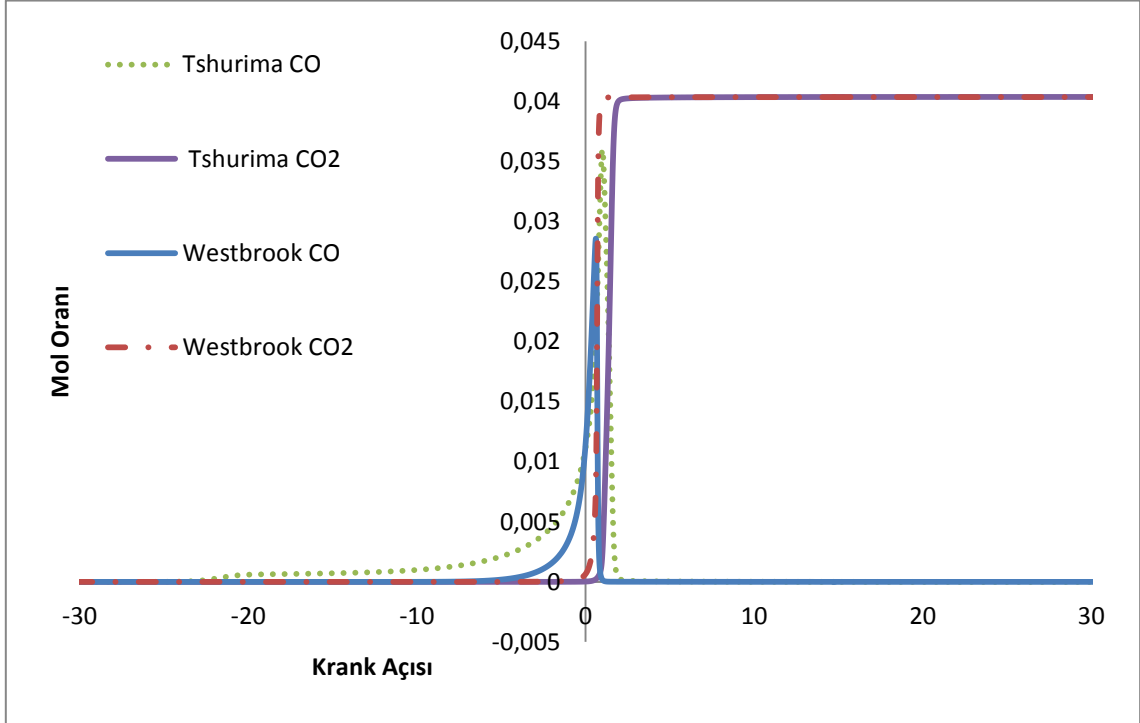
Şekil 4.20. Krank Açısına Göre CO ve CO<sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=4$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



Şekil 4.21. Krank Açısına Göre CO ve CO<sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.75$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )

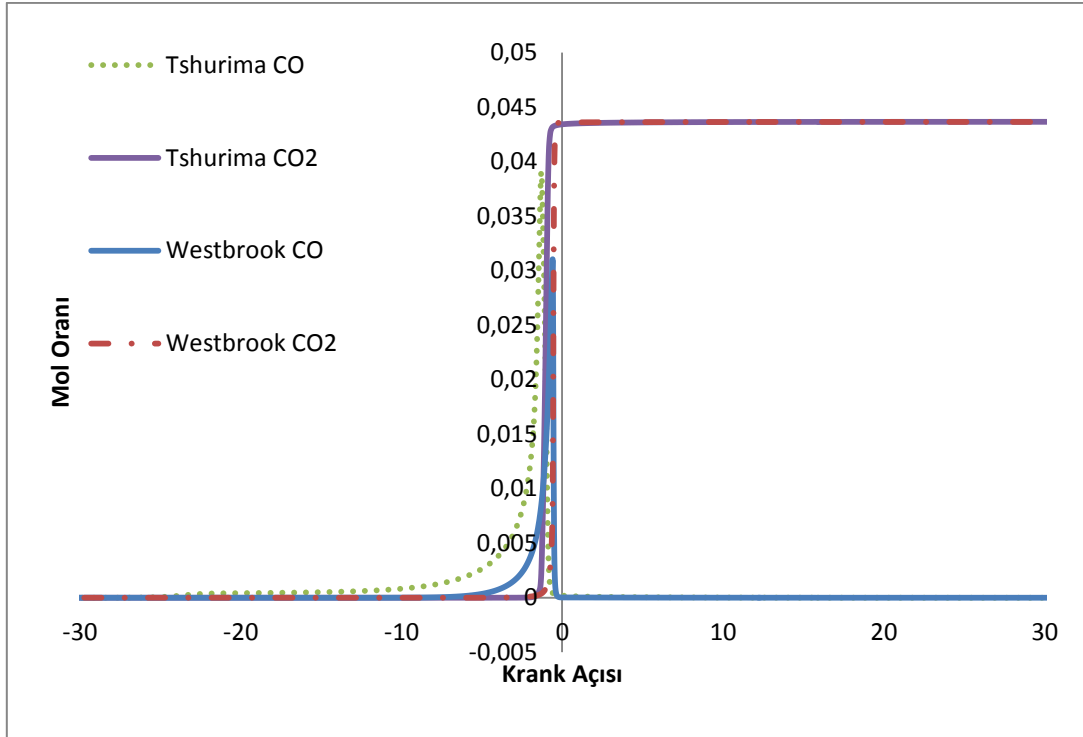


Şekil 4.22. Krank Açısına Göre CO ve CO<sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.5$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )



Şekil 4.23. Krank Açısına Göre CO ve CO<sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3.25$ ,  $T=250^\circ\text{C}$ )

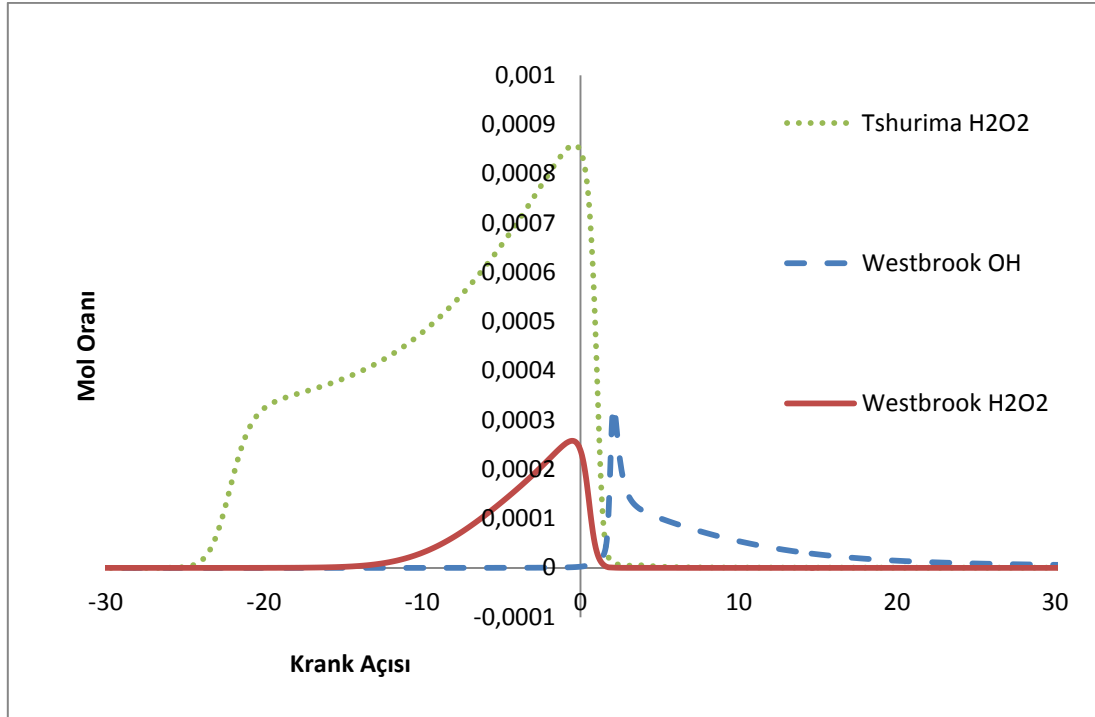




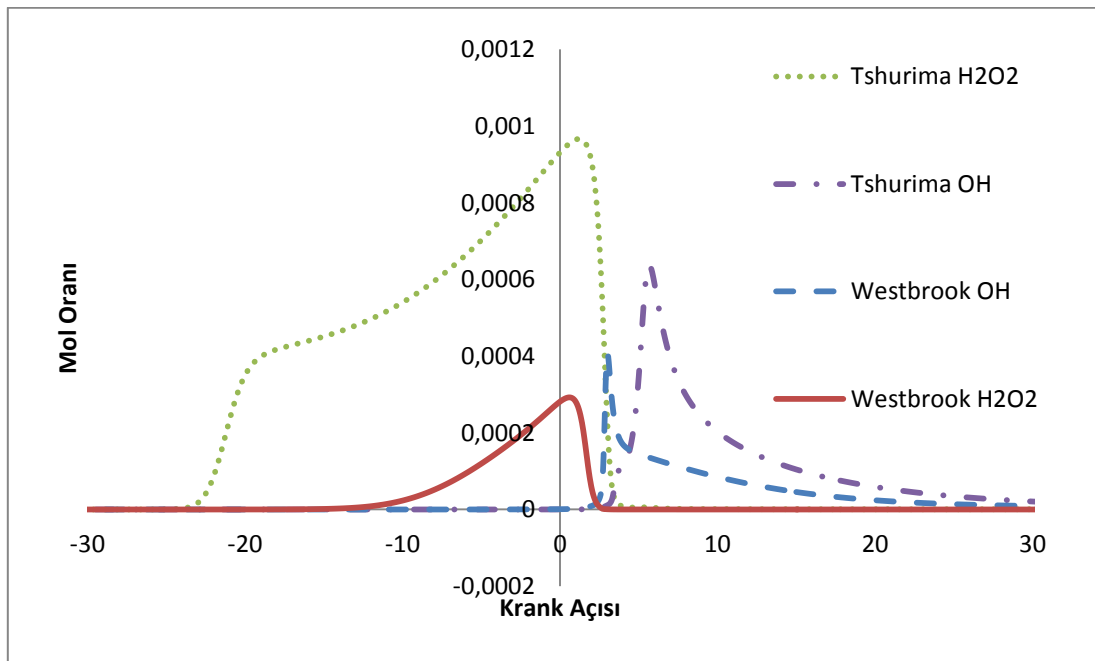
Şekil 4.24. Krank Açısına Göre CO ve CO<sub>2</sub> Oluşumu ( $\lambda=3$ ,  $T=250^{\circ}\text{C}$ )

#### 4.5. OH ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Grafikleri

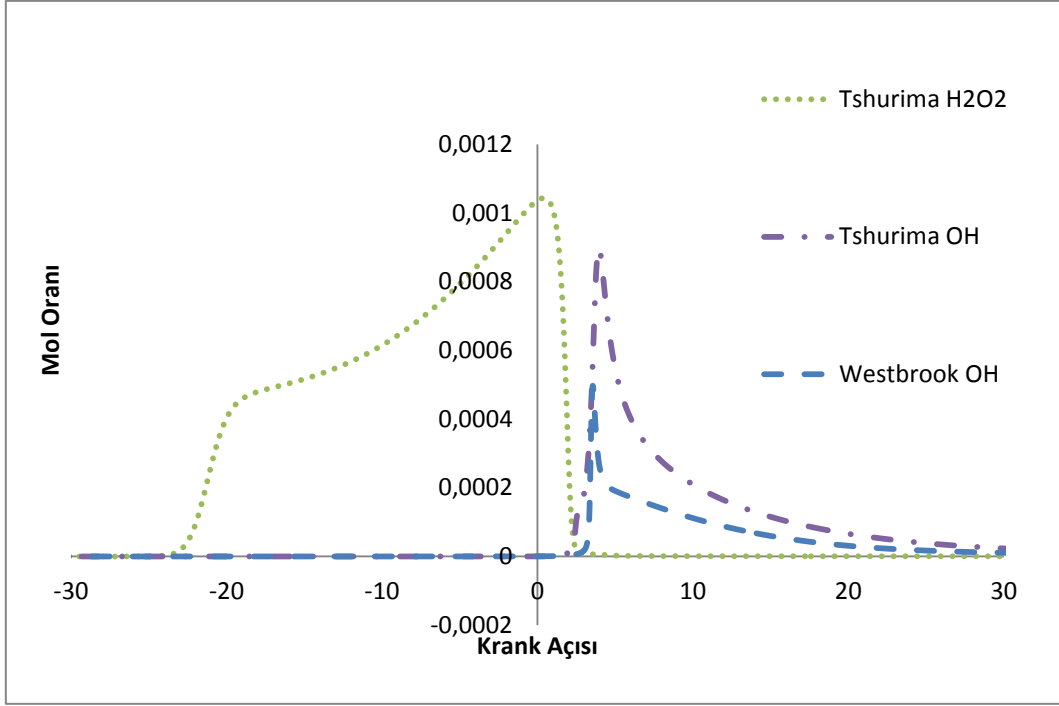
Analiz sonucu elde edilen verilerle çizilen grafiklerde krank açısına bağlı olarak OH oluşumu ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> emisyon değerleri görülmektedir. Tshurima indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma değerleri için OH grafikleri +1 ile +3 krank açısında ani bir yükselişle maksimum noktaya ulaşmakta 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 -1 ile +3 değerleri arasında iken ani bir yükselişe geçmektedir. Oluşum miktarı açısından maksimum değeri indirgenmiş mekanizmadan daha az seviyede olduğu görülmektedir. Yine 30 krank açısında tükenmektedir. Tshurima indirgenmiş kimyasal mekanizması için H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> emisyon değerleri 3, 3.5, 4, 4.25 hava fazlalık katsayısı değerleri için -25 krank açısında yükselmeye başlamıştır. 3.25 ve 3.75 hava fazlalık katsayısı değerlerinde ise +3 krank açısında yükselmeye başlamıştır. Westbrook detaylı kimyasal mekanizması için H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> emisyon değerleri ise 3, 3.5, 4, 4.25 hava fazlalık katsayısı değerlerinde -12 krank açısında yükselmeye başlamıştır. 3.25 ve 3.75 hava fazlalık katsayısı değerlerinde ise -25 krank açısında yükselmeye başlamaktadır. Westbrook detaylı kimyasal kinetik mekanizmasında tüm hava fazlalık değerleri için +2 krank açısında H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> emisyon değerlerinin sıfıra geldiği görülmektedir. Tüm grafiklerden görüleceği üzere indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma değerleri detaylı kimyasal kinetik mekanizma değerlerinden daha yüksektir. Dolayısıyla H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin reaksiyonu daha hızlı gerçekleşmektedir. Bilindiği gibi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin dekompozisyonu motorlarda hidrokarbon yakıtların otomatik ateşlenmesine neden olan zincir reaksiyonların en önemli parçasını oluşturmaktadır [37, 38]. Buji ateşlemeli motorlarda H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vuruntuya neden olabileceği gibi dizel motorlarda otomatik ateşleme H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin ayrışmaya başlaması ile olmaktadır [39, 40]. HCCI motorların çalışmasında eş zamanlı ateşleme olduğundan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin dekompozisyonu yanmanın gerçekleşmesinde önemli rol oynar [41].



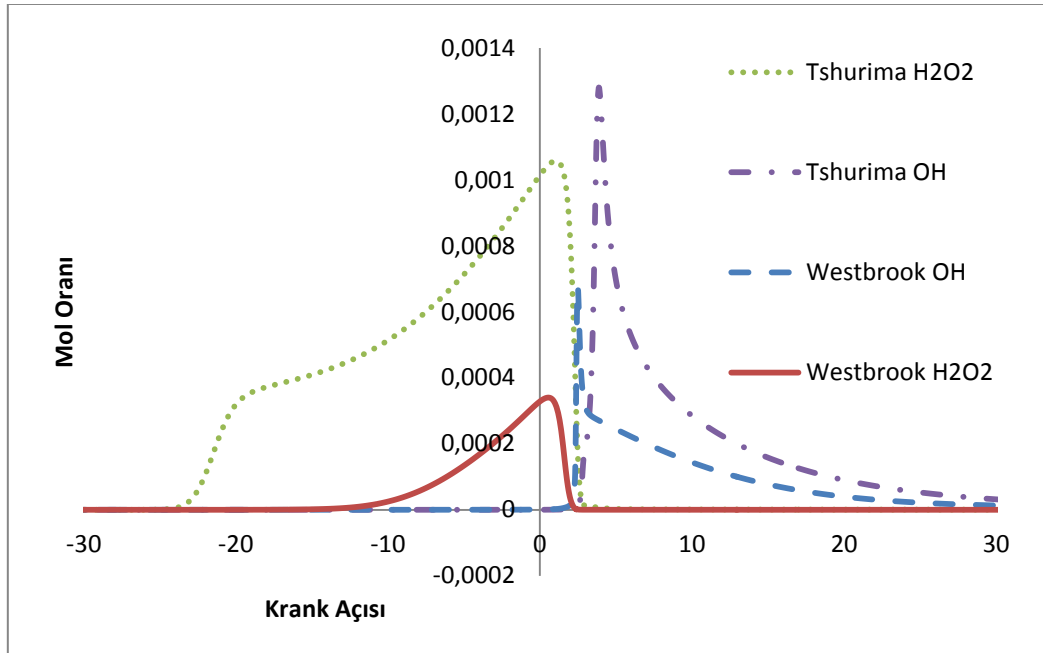
Şekil 4.25. Krank Açısına Göre OH VE  $H_2O_2$  Oluşumu ( $\lambda=4.25$ ,  $T=250^\circ C$ )



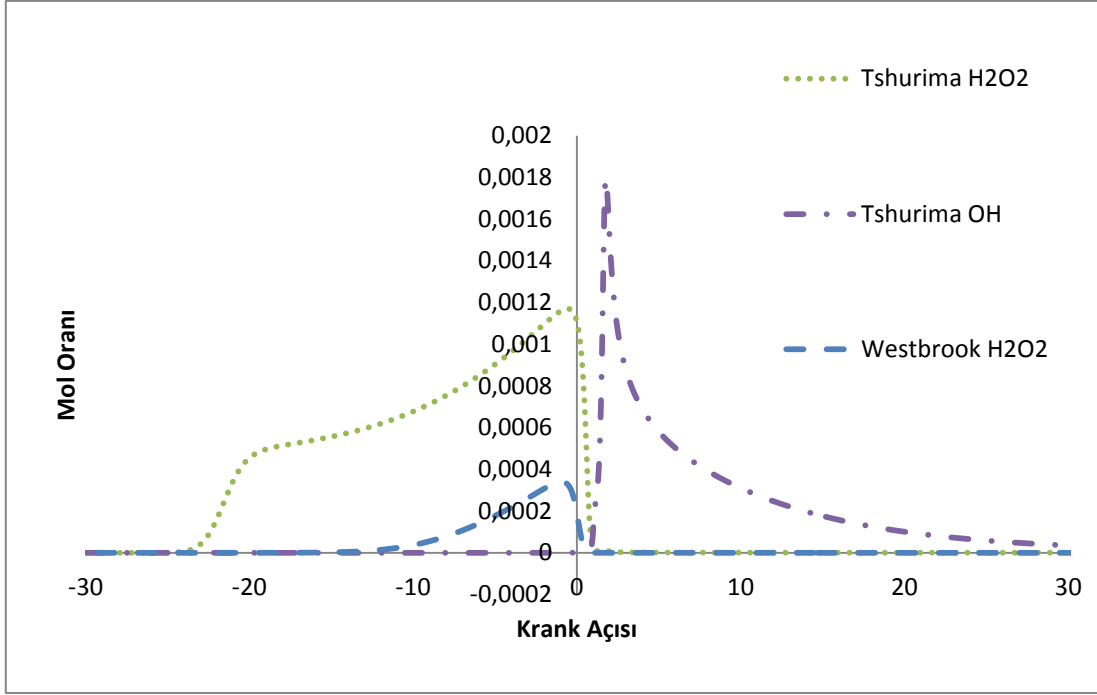
Şekil 4.26. Krank Açısına Göre OH VE  $H_2O_2$  Oluşumu ( $\lambda=4$ ,  $T=250^\circ C$ )



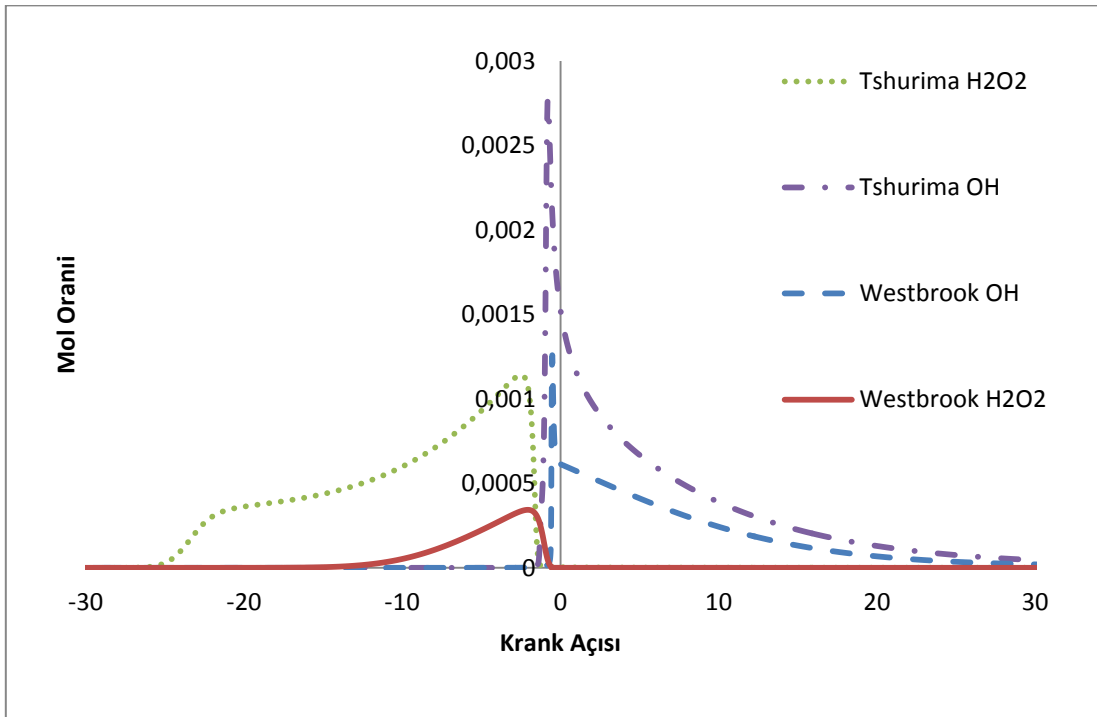
Şekil 4.27. Krank Açısına Göre OH VE  $H_2O_2$  Oluşumu ( $\lambda=3.75$ ,  $T=250^\circ C$ )



Şekil 4.28. Krank Açısına Göre OH VE  $H_2O_2$  Oluşumu ( $\lambda=3.5$ ,  $T=250^\circ C$ )



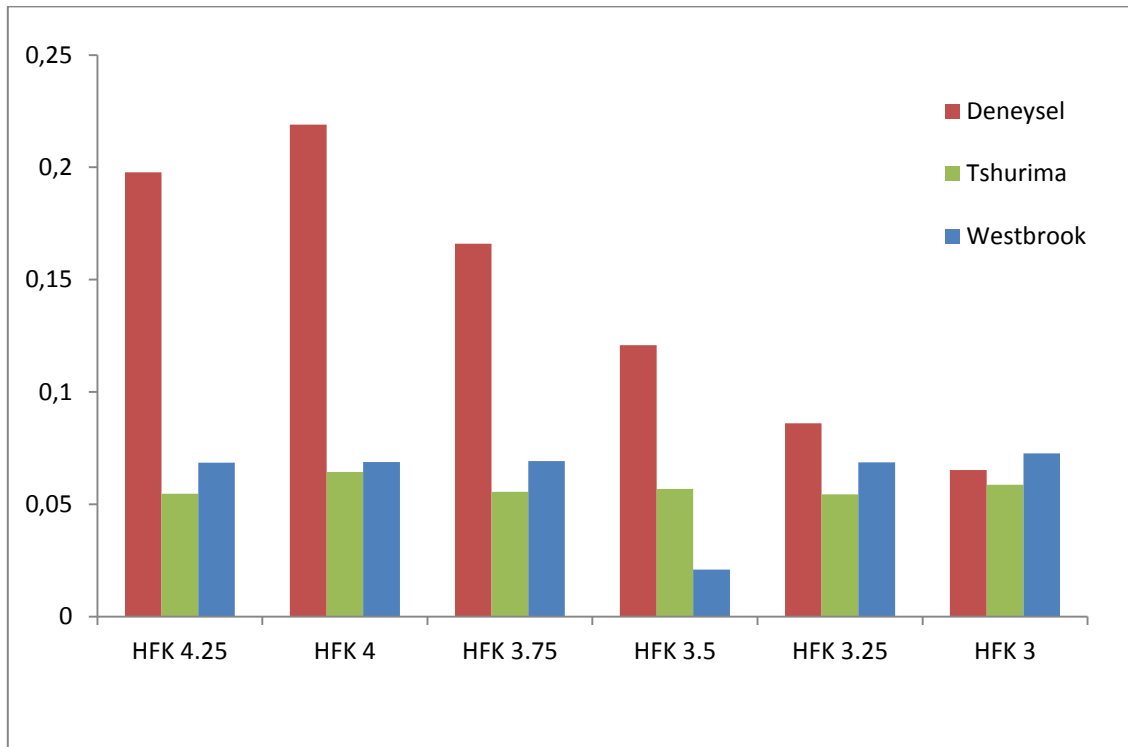
Şekil 4.29. Krank Açısına Göre OH VE  $H_2O_2$  Oluşumu ( $\lambda=3.25$ ,  $T=250^\circ C$ )



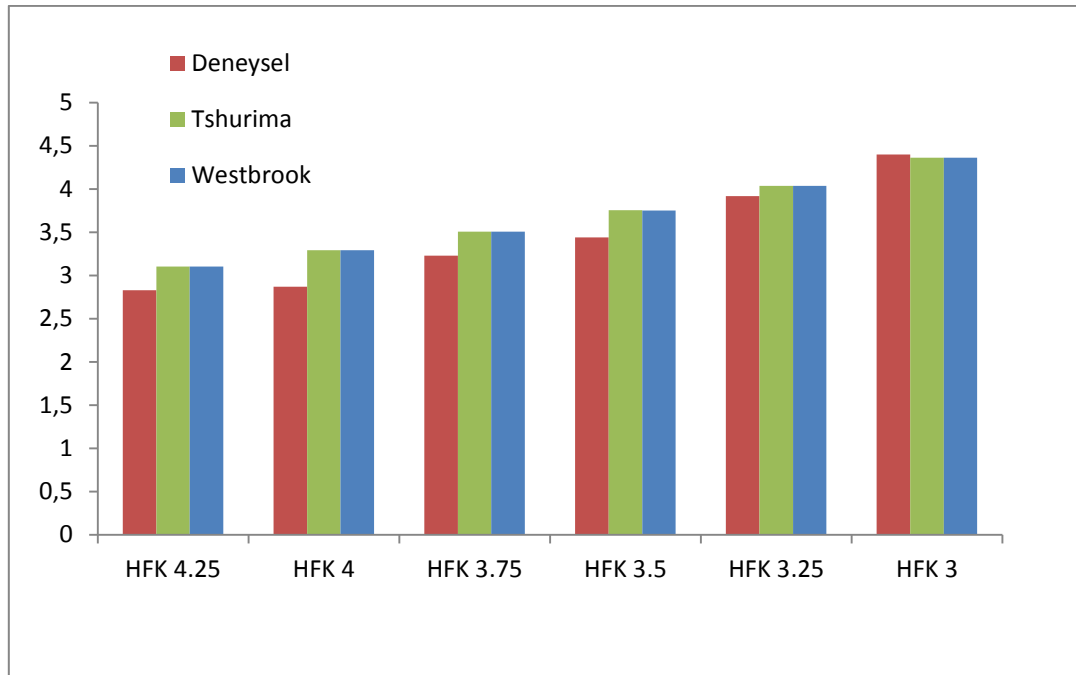
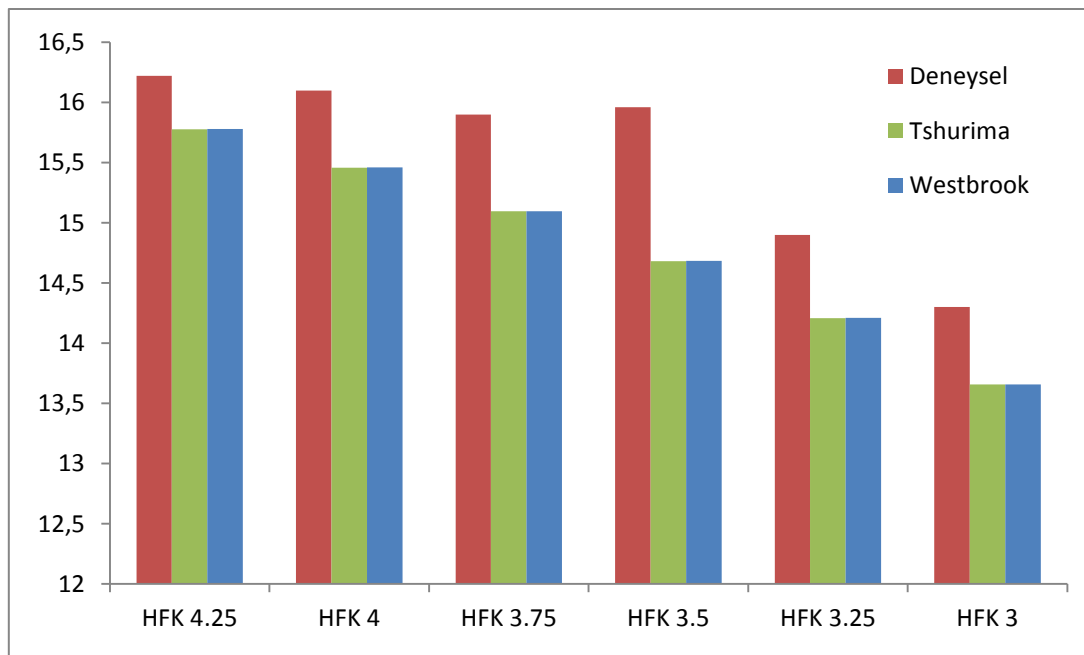
Şekil 4.30. Krank Açısına Göre OH VE  $H_2O_2$  Oluşumu ( $\lambda=3$ ,  $T=250^\circ C$ )

#### 4.6. Yanma Sonucu Emisyon Değerlerinin Yüzdesele Gösterimi

Analiz sonucunda altı farklı hava fazlalık katsayısı için CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> emisyon değerleri grafikler çizilerek deneysel sonuçlarla mukayese edilmiştir. Altı farklı hava fazlalık katsayısının yaklaşık olarak ortalaması alınırsa CO emisyonları için %0,09'luk bir yanılma payı göze çarpmaktadır. CO<sub>2</sub> emisyonlarına bakıldığında ise %0,22 mertebesinde bir yanılma payı olduğu gözlenmektedir. Aynı şekilde O<sub>2</sub> emisyonları incelendiğinde ise %0,77'lik bir yanılma payı göze çarpmaktadır. Görüldüğü üzere %0,1 in altında yanılma payıyla çok iyi sonuçlar alınmıştır. Chemkin programının kimyasal kinetik mekanizma geliştirmede iyi olduğu görülmüştür. Mekanizmalar arası bir mukayese yapılacak olursa da bileşen sayısının artmasıyla daha iyi sonuçlar alınacağı kanaati, Tshurima indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizmasının Westbrook detaylı kimyasal kinetik mekanizmasıyla neredeyse aynı sonuçları vermesiyle ortadan kalkmıştır.



Şekil 4.31. CO Emisyon (%)

Şekil 4.32. CO<sub>2</sub> Emisyon (%)Şekil 4.33. O<sub>2</sub> Emisyon (%)

## **BÖLÜM 5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME**

Yapılan analizler sonucunda Chemkin-Pro programının kimyasal kinetik mekanizma geliştirmede iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Fakat Chemkin-Pro programında detaylı piston modellemesi olmadığından ve analizleri tek hacim kabulüyle yaptığı için analiz sonuçlarının deneysel sonuçlardan farklı olduğunu görülmektedir. Ayrıca Chemkin-Pro programının 0-boyutlu analiz programı olmasından dolayı ve tüm yanma hacmini HCCI motor için homojen kabul ederek analiz yaptığı için basınç-krank mil açısı grafiklerinde deneysel verilere çok iyi yaklaşmadığı görülmektedir.

Yanma sonucu emisyon değerlerine bakıldığında ise Chemkin-Pro programının deneysel emisyon değerlerine çok yakın olduğu gözlemlenmektedir. Emisyon değerleri açısından % 0,1'in altındaki yanılma payları göz önüne alındığında Chemkin-Pro programının kimyasal kinetik mekanizma geliştirmede iyi olduğu belli olmaktadır. Analizlerde kullanılan kimyasal kinetik mekanizmalar için ne kadar bileşen sayısı fazla olursa o kadar iyi sonuç vereceği kanaati vardır. Fakat yapılan analiz sonucunda indirgenmiş kimyasal mekanizma olan Tshurima 33 bileşene sahip olmasına rağmen, Westbrook tarafından geliştirilen 1550 bileşene sahip detaylı kimyasal mekanizma ile neredeyse aynı emisyon sonuçlarını vermiştir.

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 analizler dakikalar mertebesinde yapılabilir. Kimyasal kinetik mekanizmalar arasında çözüm süresi için mukayese yapılacak olursa, indirgenmiş kimyasal kinetik mekanizma için çözüm süresi detaylı kimyasal kinetik mekanizmaya oranla on kat kısadır. Daha hızlı analiz olanağı sağlamaktadır.



HCCI motorlarla ilgili bir değerlendirme yapılacak olursa, HCCI motorların kullanımının yaygınlaşacağı yapılan çalışmalar sonucu görülmektedir. Yüksek verimleri ve oldukça düşük emisyon değerleri bu motorları cazip hale getirmektedir. Bu motorlarda, homojen yakıt-hava karışım sıcaklığı yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığının aştığında, tutuşma silindir içerisinde homojen olarak kendiliğinden gerçekleşmektedir. Alev sıcaklığı  $NO_x$  üretiminin gerçekleştiği sıcaklığın daha altında kaldığından  $NO_x$  emisyon değerleri oldukça düşüktür. Homojen fakir karışımlı yanmanın pompalama kayıplarını minimize etmesi sonucu partikül madde (is) oluşturmadan yüksek ısıl verim sağlamaktadır. Bunun bir diğer ifadesi olarak HCCI motorlarda karışımın genellikle fakir olması gösterilebilir. Bu sebeple ortalama maksimum basıncı buji ateşlemeli motorlara göre oldukça düşük olmaktadır. Bunun sonucu olarak HCCI motorlar çok düşük azot oksit emisyonlarına ( $NO_x$ ), yüksek verim ve ihmal edilebilir lde partikül madde emisyonlarına sahiptirler.

## KAYNAKLAR

- [1] J.C.G. ANDRAE T. BRINCK, G.T. KALGHATGI HCCI experiments with toluene reference fuels modeled by a semidetailed chemical kinetic model. Volume 155, Issue 4, Pages 696–712, December 2008.
- [2] <http://www.reactiondesign.com>, Erişim Tarihi: 15.01.2014.
- [3] EASLEY, W., AGARWAL, A., and LAVOIE, G., "Modeling of HCCI Combustion and Emissions Using Detailed Chemistry," SAE Technical Paper 2001-01-1029, 2001.
- [4] OGUMA, M., GOTO, S., OYAMA, K., SUGIYAMA, K. et al., "The Possibility of Gas to Liquid (GTL) as a Fuel of Direct Injection Diesel Engine," SAE Technical Paper 2002-01-1706, 2002.
- [5] LOVAS, T., MAUSS, F., HASSE, C., and PETERS, N., "Modeling of HCCI Combustion Using Adaptive Chemical Kinetics," SAE Technical Paper 2002-01-0426, 2002.
- [6] ELKELAWY, M., YU-SHENG, Z., EL-DIN, H., and JING-ZHOU, Y., "A comprehensive Modeling Study of Natural Gas (HCCI) Engine Combustion Enhancement by Using Hydrogen Addition," SAE Technical Paper 2008-01-1706, 2008.
- [7] JUNNIAN ZHENG, JERALD 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, Pages 298-304, January 2012.
- [8] JUNNIAN ZHENG, JERALD 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, Pages 386-394, April 2012.
- [9] BORGMAN, G. L., RAGLAND, K.W., Combustion Engineering, McGraw Hill, International Ed., New York, USA, 1-444, 1998.
- [10] DİESEL, R., DE patent 67207: „Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen“ pg 4.

- [11] LEDUC M., "Biography of Rudolph Diesel".
- [12] Scania fordonshistoria 1891-1991 |year=1992 |language=Swedish |isbn=91-7886-074-1} } (Translated title: Vehicle history of Scania 1891-1991), 1992.
- [13] Volvo – Lastbilarna igar och idag |year=1987 |language=Swedish |isbn=91-86442-76-7} } (Translated title: Volvo trucks yesterday and today)), 1987.
- [14] STONE, R., Introduction to Internal Combustion Engines 3rd ed., SAE International, Inc., England, 1-611, 1999.
- [15] ONISHI S, JO SH, SHODA K, JO PD, KATO S. Active thermo-atmosphere combustion (ATAC)—a new combustion process for internal combustion engines. SAE 790501.
- [16] NOGUCHI M, TANAKA Y, TANAKA T, TAKEUCHI Y. A study on gasoline engine combustion by observation of intermediate reactive products during combustion. SAE 790840.
- [17] NAJT, PM., FOSTER, DE., Compression-ignited homogeneous charge combustion. SAE 830264.
- [18] THRING, RH., Homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. SAE 892068.
- [19] WOSCHNI, G., A Universally Applicable Equation for Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine, SAE Paper No: 670931, 1967.
- [20] WESTBROOK, C.K., DRYER, F.L., Chemical Kinetics and Modeling of Combustion Processes, 18. Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Waterloo, Canada, August 17-22, 749-767, 1981.
- [21] CHEVALIER, C., PITZ, W.J., WARNATZ, J., WESTBROOK, C.K., and Mclenk, H., Hydrocarbon Ignition: Automatic Generation of Reaction Mechanism and Applications to Modeling of Engine Knock, 24. Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Sydney, Australia, July 5-10, 93-101, 1992.
- [22] WESTBROOK, C.K., PÍTZ, W.J., LEPPARD, W., The Autoignition Chemistry of Paraffinic Fuels and Pro-Knock and Anti-Knock Additives: A Detailed Chemical Kinetic Study, S A E Paper No: 912314, 1991.
- [23] WESTBROOK, C.K., DRYER, F.L., Chemical Kinetics and Modeling of Combustion Processes, 18. Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Waterloo, Canada, August 17-22, 749-767, 1981.

- [24] TOWERS, J.M., HOEKSTRA, R.L., Engine Knock, A Renewed Concern in Motorsports-A Literature Review, SAE Transactions, Journal of Engines, 3, No: 983026, 2343-2353, 1998.
- [25] LI, H., MILLER, D.L., CERNANSKY N.P., Development of a Reduced Chemical Kinetic Model for Prediction Reactivity and Autoignition of Primary Reference Fuels, SAE Paper No: 960498, 1996.
- [26] MAUSS, F., Chemical Kinetics Lecture Notes, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 1999.
- [27] CHEVALIER, C., Entwicklung eines detaillierten Reaktionsmechanismus zur Modellierung der Verbrennungsprozesse von Kohlenwasserstoffen bei Hoch- und Niedertemperatur-bedingungen, Ph.D. Thesis, Universitat Stuttgart, Germany, 1993.
- [28] MULLER, U., Reduzierte Reaktions Mechanismen fur die Zundung von n-Heptan and iso-oktan unter Motor relevanter Bedingunge, Ph.D. Thesis, RWTH Aachen, Germany, 1993.
- [29] BOOD, J., BENGTSSON, P., MAUSS, F., BURGDORF, K., DENBRATT, I., Knock in Spark-Ignition Engines: End-Gas Temperature Measurements Using Rotational Calculations of the Autoignition Process, SAE Paper No: 971669, 1997.
- [30] CALLAHAN, C.V., HELD, T.J., DRYER, F. L. , MINCTTI, R., RIBACOR, M., SOCKET, L.R., FARAVELLI, T., GAFFURI, P., RANZI, E., Experimental Data and Kinetic Modeling of PRF Mixtures, 26. Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Napoli, Campi Phlearaci, Italy, July 28 - August 2, 739-746, 1996.
- [31] FIEWEGER, K., BLUMCNTHAK, R., ADOMEIT, G., Self Ignition of SI Engine Model Fuels: A Shock Tube Investigation at High Pressure, Combustion and Flame, 109, 599-619, 1997.
- [32] CHRISTOPHER J. MONTGOMERY, DAVID A. SWENSEN, TYSON V. HARDING, MARC A. CREMER, MICHAEL J. BOCKELIE. A computational problem solving environment for creating and testing reduced chemical kinetic mechanisms. Volume 33, Issue 2, Pages 59–70, February 2002.
- [33] T. TSURUSHIMA, A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion, Proceedings of the Combustion Institute, 32, 2835–2841, 2009.
- [34] MARCO MEHL, WILLIAM J. PITZ, CHARLES K. WESTBROOK, HENRY J. CURRAN; Kinetic modeling of gasoline surrogate components and mixtures under engine conditions, Proceedings of the Combustion Institute, 33, 193–200, 2011.

- [35] H.S. SOYHAN, H. YASAR, H. WALMSLEY, B. HEADADA, G.T. KALGHATGI, C. SORUSBAY; Evaluation of heat transfer correlations for HCCI engine modeling, *Applied Thermal Engineering* 29, 541–549, 2009.
- [36] H.S. SOYHAN, H. YASAR, H. WALMSLEY, B. HEADADA, G.T. KALGHATGI, C. SORUSBAY; Evaluation of heat transfer correlations for HCCI engine modeling, *Applied Thermal Engineering* 29, 541–549, 2009.
- [37] C.K. WESTBROOK, *Proc. Combust. Inst.* 28, 1563–1577, 2000.
- [38] J.F. GRIFFITHS, K.J. HUGHES, R. PORTER, *Proc. Combust. Inst.* 30, 1083–1091, 2005.
- [39] W.J. PITZ, C.K. WESTBROOK, *Combust Flame* 63, 113–133, 1986.
- [40] B. LI, M. JONSSON, M. ALGOTSSON, J. BOODA, Z.S. LI, O. JOHANSSON, M. ALDEN, M. TUNER, B. JOHANSSON, *Proceedings of the Combustion Institute* 34, 3573–3581, 2013.
- [41] S. TANAKA, F. AYALA, J.C. KECK, *Combust Flame* 133, 467–481, 2003.

## ÖZGEÇMİŞ

Ömer Mustafa GÖBELOĞLU 11.07.1987 Kastamonu'da doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Kastamonu'da tamamladı. 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Enerji Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2011 yılında evlendi ve aynı yıl Delta Teknik Mühendislik firmasını kurdu. Yöneticisi olduğu firmada çalışmaya devam etmektedir.