

**YANMANIN MODELLENMESİ VE BİR GRAFİK
ARA YÜZ KULLANIMI İLE
EMİSYON TAHİMİNİ**

Emrah ESİN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı
Prof. Dr. M. Akif CEVİZ**

2014

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YANMANIN MODELLENMESİ VE BİR GRAFİK ARA YÜZ
KULLANIMI İLE EMİSYON TAHMİNİ**

Emrah ESİN

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM
2014**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

Yanmanın Modellenmesi ve Bir Grafik Ara Yüz Kullanımı ile Emisyon Tahmini

Prof. Dr. M. Akif CEVİZ danışmanlığında, Emrah ESİN tarafından hazırlanan bu çalışma 19/09/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından MakineMühendisliği Anabilim Dalı – Enerji Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Kemal ÇOMAKLI

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. K. Vefa EZİRMİK

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 23. / 10. / 2014. tarih ve 42 / 1456. nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YANMANIN MODELLENMESİ VE BİR GRAFİK ARA YÜZ KULLANIMI İLE EMİSYON TAHMİNİ

Emrah ESİN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

İçten yanmalı motorların modellenmesi için yapılan çalışmalarda, başlangıçta sabit hacim ve sabit basınç ideal çevrimler kullanılmaya çalışıldı. İçten yanmalı motorların simülasyonu, yüksek hızda bilgisayar programlarının gelişmesiyle daha çok gelişmiş ve daha hassas hale gelmiştir. En basitten en karmaşığa, motor simülasyonları, motor içerisinde çalışan akışkanın özelliklerinin bilinmesini gerektirir.

Yanma hesaplarının bir diğer kullanım alanı da eğitim faaliyetleridir. Lisans düzeyinde veya lisans üstü düzeyde “İçten Yanmalı Motor” derslerinde, yanma ürünlerinin özelliklerinin değişimi çok önemli bir konudur ki bu konu hakkında bilinen her gelişmiş bilgi, eğitmeni farklı kılar.

Bu çalışmada, farklı sıcaklık, basınç ve eküvalans oranlarında, her tür ve yanma ürünlerinin karışımının termo-kimyasal özellikleri için yanma ürünlerinin bileşimini hesaplamak için bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu programı kullanarak, motor simülasyonları geliştirmek için yanma ürünlerinin özelliklerini termo-kimyasal olarak hesaplamak mümkündür. Devamında, kullanıcı dostu bir Grafik Kullanıcı Ara Yüzü (GUI) programı, hidrokarbonun yanması sonucu, bazı parametrelerin etkilerini öğrenmek için geliştirilmiştir. Son olarak, yanma ürünleri molar bileşimine basınç ve sıcaklığın etkisi GUI programıyla incelenmiştir.

2014, 91 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Yanmanın modellenmesi, Denge Katsayıları Metodu, Emisyon, Matlab, Grafik kullanıcı arayüzü (GUI).

ABSTRACT

MS Thesis

COMBUSTING MODELLING AND EMISSIONS PREDICTIONS BY USING A GRAPHICAL USER INTERFACE

Emrah ESİN

Atatürk University
Graduate School of Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Department of Energy

Supervisor: Prof. Dr. M. Akif CEVİZ

In order to simulate the internal combustion engines, researches have initially attempted to use the constant-volume and constant-pressure ideal cycles. The simulation of internal combustion engine processes have become much more sophisticated and accurate with the development of high speed computers. Engine simulations, from the simplest to the most complex ones, require models for the composition and properties of working fluids inside engine.

Another using area of combustion calculations is educational activities. In under graduate or graduate level “Internal Combustion Engine” courses, the variation of the properties of combustion products is a very important subject that can challenge for instructors.

In this study, a computer program was prepared to compute the composition of the combustion products for different temperatures, pressures and equivalence ratios, and the thermo-chemical properties of each species and mixture of combustion products. By using the program, it is possible to compute the thermochemical properties of combustion products to develop the engine simulations. Then, a user friendly Graphical User Interface (GUI) program was developed for teaching the effects of some parameters on hydrocarbon combustion. Lastly, the effects of temperature an pressure on the molar composition of combustion products were examined by the GUI program.

2014, 91 Pages

Keywords: Combustion Modeling, Balance Coefficient Method, Emissions Matlab, Graphical user interface (GUI).

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma boyunca ve Lisans eğitimim boyunca her türlü yardım ve desteğini benden esirgemeyen, bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren, danışman hocam Sayın Prof. Dr. M. Akif CEVİZ'e teşekkür ederim.

Eğitimimin tamamlanmasında her türlü maddi ve manevi desteğini üzerinden esirgemeyen teyzem Türkan TÜTENK'e sonsuz teŐekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca sevgili dostum ArŐ. Gör. Galip KALTAKKIRAN'a da gerek tezime katkılarından, gerekse de samimi dostluğundan dolayı teŐekkürler ederim.

Emrah ESİN

Eylül, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Teorik Modelleme Esasına Dayanılarak Yapılan Çalışmalar.....	7
1.2. Amaç.....	14
1.3. Kapsam.....	15
2. KURAMSAL TEMELLER.....	16
2.1. Yanma.....	16
2.2. Yakıtlar.....	17
2.3. Yanma Kimyası.....	18
2.3.1. Stokiometrik hava.....	20
2.3.2. Hava fazlalık katsayısı.....	21
2.3.3. Tam yanma.....	21
2.3.4. Fakir yanma.....	22
2.3.5. Zengin yanma.....	22
2.3.6. Hava-yakıt oranı.....	23
2.3.7. Yakıt-hava oranı.....	23
2.4. Yanma Stokiometrisi.....	23
2.5. Yanma ve Termodinamiğin Birinci Yasası.....	28
2.5.1. Reaksiyon ısısı.....	31
2.5.1.a. Oluşum entalpisi.....	32
2.5.1.b. Isıl değer.....	34
2.6. İdeal Gaz Hal Denklemleri.....	34
2.7. Stokiometrik ve Düşük Sıcaklıkta Yanmanın Modellenmesi.....	38
2.8. Genel Kimyasal Denge.....	42

2.8.1. Gibbs serbest enerjisinin minimizasyonu.....	42
2.8.2. Denge katsayıları ile kimyasal denge.....	48
2.9. Emisyon ve Hava Kirliliği.....	52
2.9.1. Karbon monoksit.....	52
2.9.2. Azot oksitler.....	54
2.9.3. Hidrokarbonlar.....	58
2.9.4. Kükürt oksitler.....	59
2.9.5. Partikül maddeler.....	60
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	61
3.1. Matlab.....	61
3.1.1. Matlab ortamında hazırlanan bazı örnekler.....	66
3.2. Matlab GUI.....	71
3.2.1. Matlab GUI’de kullanılan nesnelere ve özellikleri.....	74
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	76
4.1. Oluşturulan Grafik Kullanıcı Ara Yüzü Programı.....	76
4.2. Programın Değişik Sıcaklık ve Basınç Aralığında Çalıştırılması ve Sonuçlar ..	82
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	86
5.1. Sonuçlar.....	86
5.2. Öneriler.....	88
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Hava
a_s	Yanma için gerekli olan hava miktarı
C	Karbon
CH ₃	Metil kökü
CH ₃ OH	Metil alkol
CH ₄	Metan
C ₂ H ₂	Asetilen
C ₃ H ₅	Propil kökü
C ₃ H ₆	Propan
C ₈ H ₁₈	Oktan
C ₁₂ H ₂₆	Dodekan
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
dV	Diferansiyel hacim
dP	Diferansiyel basınç
F	Yakıt
g	Birim mol başına Gibbs Enerjisi (kJ/kmol)
G	Gibbs Enerjisi (kJ)
H	Hidrojen
H ₂	Hidrojen gazı
HO ₂	Hidrojen peroksit kökü
H ₂ O	Su
H ₂ S	Hidrojen sülfür
HCN	Hidrojen siyanür
h	Birim kütle başına entalpi (kJ/kg)
\bar{h}	Birim mol başına entalpi (kJ/kmol)
h_b	Buharlaşma entalpisi (kJ/kmol)
\bar{h}^o	25°C ve 1 atmosferde standart oluşum entalpisi (kJ/kmol)
\bar{h}_{ol}^o	Oluşum entalpisi (kJ/kmol)
K	Kelvin
K _p	Basınçlar cinsinden denge sabiti
m	Kütle (kg)
M	Molekül ağırlığı (kg)
N	Mol sayısı
N	Azot
N ₂	Azot gazı
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	Sodyum sülfat tuzu
NO	Azot monoksit
NO ₂	Azot dioksit
NO _x	Azot oksitler

O	Oksijen
O ₂	Oksijen gazı
OH	Hidroksit
P	Basınç (kPa)
P _o	Toplam basınç (kPa)
Q	Isı (kJ)
R	Yoğun kütle gaz sabiti
R _u	Yoğun molar gaz sabiti
s	Birim kütle başına entropi (kJ/kg.K)
\bar{s}	Birim mol başına entropi (kJ/kmol.K)
\bar{s}^o	25°C ve 1 atmosfer basınçta standart entropi (kJ/kg K)
SO _x	Kükürt oksit
T	Sıcaklık
u	Birim kütle başına iç enerji (kJ/kg)
\bar{u}	Birim mol başına iç enerji (kJ/kmol)
v	Özgül hacim (m ³ /kg)
V	Hacim
W	İş (kJ)
x	Kütle fraksiyonu
y	Mol fraksiyonu
λ	Hava fazlalık kat sayısı
λ_i	Lagrange Çarpanları
ϕ	Eküvalans oranı
ΔE	Enerji değişimi (kJ)
ΔU	İç enerji değişimi (kJ)
ΔH	Entalpi değişimi (kJ)
ΔS	Entropi değişimi (kJ/K)
μ	Kimyasal potansiyel
μ^o	25°C ve 1 atmosfer basınçta standart kimyasal potansiyel

Kısaltmalar

AID	Alt ısııl değer
CFR	Yakıt araştırma motoru
CNG	Sıkıştırılmış doğal gaz
DI-HCCI	Dizele modifiye edilmiş homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motor
EGR	Egzoz gazı resirkülasyonu
GUI	Kullanıcı grafik ara yüzü
HC	Hidrokarbon
HCCI	Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motor
KE	Kinetik enerji
LNG	Sıvılaştırılmış doğal gaz
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
Matlab	Matris Laboratuvarı

MPa	Megapaskal
PE	Potansiyel enerji
ppm	Milyonda bir kütle
rpm	Dakika başına devir sayısı
ÜİD	Üst ısı değer

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Motorun CO emisyon değişimleri	5
Şekil 1.2. Motorun HC emisyon değişimleri	5
Şekil 1.3. Farklı motor yüklerinde egzoz emisyonlarına biyodizel etkileri.....	7
Şekil 1.4. Deneysel ve hesaplamalı silindir içi basınç eğrileri	10
Şekil 1.5. Gibbs.java programı grafik çıktısı veren rgui.java programı	12
Şekil 2.1. Değişik sıcaklıklarda oktan (C ₈ H ₁₈) ve havanın yanma kompozisyonu.....	46
Şekil 2.2. 3000 K'de oktan (C ₈ H ₁₈) ve havanın yanma denge kompozisyonu.....	47
Şekil 2.3. Yanma odasında farklı konumlardaki NO konsantrasyonunun zamana göre değişimi.....	56
Şekil 2.4. Azot oksit konsantrasyonunun zamana göre değişimi.....	57
Şekil 2.5. Yanma odası cidarlarındaki alev sönme bölgesi fotoğrafı	59
Şekil 3.1. Matlab başlatılırken kullanıcı karşısına gelen ilk pencere.....	63
Şekil 3.2. GUI açıldığında kullanıcı karşısına gelen pencere	68
Şekil 3.3. GUI ile oluşturulan bir ara yüz örneği.....	71
Şekil 3.4. Örnek 3.1 için GUI ile oluşturulan ara yüzün ilk hali	72
Şekil 3.5. Örnek 3.1 için GUI ile oluşturulan bir ara yüzün ilk sonucu.....	72
Şekil 3.6. Örnek 3.1 için GUI ile oluşturulan bir ara yüzün ikinci sonucu.....	73
Şekil 3.7. Örnek 3.2 için GUI ile oluşturulan bir ara yüzün ilk hali.....	74
Şekil 3.8. Örnek 3.2 için GUI ile oluşturulan bir ara yüzün ilk sonucu.....	74
Şekil 3.9. Örnek 3.2 için GUI ile oluşturulan ara yüzün ikinci sonucu	75
Şekil 4.1. Çalışma kapsamında oluşturulan Matlab GUI ara yüzeyi	76
Şekil 4.2. Çalışma kapsamında oluşturulan ara yüzde örnek bir hesaplama	77
Şekil 4.3. Ara yüzde oluşturulan yanma ürünleri mol fraksiyonları.....	78
Şekil 4.4. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının molar entalpi grafiği.....	78
Şekil 4.5. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının kütleli iç enerji grafiği.....	79
Şekil 4.6. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının özgül hacim grafiği.....	79
Şekil 4.7. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının molar entropi grafiği.....	80
Şekil 4.8. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının toplam mol sayısı grafiği.....	80
Şekil 4.9. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının molekül ağırlığı grafiği.....	81

Şekil 4.10. 600 ile 3000 K arası sıcaklık değerlerine göre mol fraksiyonları.....	81
Şekil 4.11. 600 ile 3000 K arası sıcaklık değerlerine göre molar entalpi değişimi	83
Şekil 4.12. 600 ile 3000 K arası sıcaklık değerlerine göre molar iç enerji değişimi	84
Şekil 4.13. 600 ile 3000 K arası sıcaklık değerlerine göre molar entropi değişimi.....	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. 25°C ve 1 atmosfer basınçta bazı bileşiklerin oluşum entalpileri.....	33
Çizelge 2.2. Molekül ağırlık, stokiometrik oran ve yanma ürünleri fraksiyonu.....	39
Çizelge 2.3. Düşük sıcaklıkta yanma ürünleri	41
Çizelge 2.4. Denklem 2.96 için denge sabitleri	51
Çizelge 2.5. Taşıtlar tarafından üretilen kirletici bileşenler.....	53
Çizelge 3.1. Matlab'de bazı fonksiyonların tanımlanması	64
Çizelge 4.1. Değişik sıcaklık değerlerine göre program çıktıları	85

1. GİRİŞ

İnsanoğlu tarihin gelişiminden beri enerji tüketmektedir. Yeni enerji kaynakları bulunduğca ve enerji dönüşüm metotları geliştirilebildikçe çok daha fazla enerji tüketmeye başlamıştır. Enerji kaynağı olarak ilk zamanlar insan gücü, devamında hayvan gücü ve enerji ihtiyaçlarının artması neticesinde yeni arayışlar içerisine girilmiştir. Sonuç olarak bir fosil yakıtın yakılmasıyla elde edilen enerjiden faydalanmaya başlanmıştır. Bu faydalanma ilk olarak ısınma ihtiyaçları içindir. Devamında teknolojik gelişmeler ve modern hayat yaşama isteğı enerji ihtiyaçlarını daha artırmıştır. Bu nedenle insanlar, yakılarak enerji elde edilen ve yakıt olarak adlandırılan maddelerden daha fazla enerji elde etmeye başlamışlardır.

Yakıt olarak nitelendirilen maddelere bakıldığında, yıllarca doğada kalıp fosilleşme sonucu oluşan maddelerdir. O nedenle fosil yakıt olarak adlandırılırlar. Bu fosil yakıtlar doğada yüzyıllar boyunca meydana gelirken; insanoğlu onu bilinçsizce kullanıp rezervlerinin azalmasına neden olmuştur. Çünkü artık birçok alanda enerji ihtiyaçları fosil yakıtlardan elde edilmeye başlandı. Örnek olarak, ısınma ihtiyaçlarında, elektrik üretiminde, buhar santrallerinde ve kazanlarında değişik proseslerde kullanılmak üzere buhar üretiminde, demir döküm sanayisinde ergitme potalarında, içten yanmalı motorlarda güç elde edilmesinde, uçak motorlarında güç elde edilmesinde, kurutma proseslerinde, kimya sanayindeki değişik proseslerde vs. verilebilir.

Tabi ki bu yakıtların böyle her alanda kullanılmasının getirmiş olduğı en büyük dezavantaj çevreye verilen emisyonlardır. Emisyon, bir yakıtın yanması sonucu çevreye verdiği zararlı gazlar ve partiküllerdir. Durum böyle olunca bilim adamları bu bilinçsizce kullanımın önüne geçebilmek için bir takım kısıtlamalar getirmişlerdir. Bu kısıtlamalar özellikle her geçen gün sayısı hızla artan otomobiller için egzoz emisyon standartları olarak daha baskın durumdadırlar. Her geçen yıl bu kısıtlamalar zorlaştırılmakta ve emisyon değerleri düşürülmektedir.

Birçok ülke emisyon değerlerinin azaltılmasını amaçlayan Kyoto Protokolünü imzaladığı için bilim adamları sürekli emisyon değerlerini azaltmaya yönelik çalışmalar yapmaktadırlar. Bu kısıtlamalar AB ülkelerinde daha önceki yıllarda zorunlu hale getirilirken ülkemizde 2009 yılında itibaren zorunlu kılınmıştır. Bu standartlardan biri, son zamanlarda sürekli ismi duyulan Euro Emisyon Standartları olup; egzozdan çıkan zararlı gazları ve partikülleri, kademeli olarak ve belirli bir zaman zarfı içerisinde azaltma programıdır.

Otomotiv kaynaklı hava kirliliği, ilk olarak 1940'ta California'da problem olarak tanımlandı ve 1960'lardan beri emisyon standartları çıkarılmakta ve geliştirilmektedir.

Ülkemizde Euro standartlarına geçiş son zamanlarda gerçekleşmiştir. 2008 yılında ilk olarak Euro Standartları'na geçilmiştir. İlk standart Euro-1 standardıdır. 2014 yılı eylül ayı itibariyle Euro-6 standardı uygulamaya geçecektir. Euro standartlarında numara büyüdükçe çevre verilecek maksimum emisyon değerleri düşmektedir. Her yeni standart egzoz emisyon değerlerini biraz daha düşürmektedir. Bu durum bilim adamlarını yakıtı az miktarda kullanıp, daha fazla enerji elde etme yolları arayışlarına mecbur bırakmaktadır. Böylece hem çevrenin emisyon açısından kirliliği azalacak hem de rezervleri kısıtlı olan fosil yakıtlar daha uzun yıllar kullanılabilir.

Fosil yakıt kullanarak enerji üretimi ve sonucunda meydana gelen emisyonlara getirilen bu kısıtlamalar teknolojik olarak işlerin zorlaşmasına ve yapılan araştırma ve geliştirmeye ayrılan bütçelerin artmasına neden olmaktadır. Bu da bilim adamlarını daha farklı enerji kaynakları aramaya sürüklemiştir. Daha farklı enerji kaynağı arayışı beraberinde, bu farklı kaynakların emisyon değerlerinin standartlara uygun olmasını da gerekli kılmaktadır. Taşıtlar için bilinen en popüler yakıt biyodizeldir. Biyodizel üzerine binlerce çalışma yapılmıştır. Fakat ham madde tedariğinin zorluğu, üretimin düşük kapasitelerde yapılmasına neden olmaktadır ki bu da maliyeti artırmaktadır.

Otomobil teknolojisinde son zamanlarda fosil yakıtlar yerine elektrik enerjisi kullanımı üzerinde çalışmalar yoğun bir biçimde devam etmektedir. Kesinlikle emisyon değerleri

sıfır olan elektrikli otomobiller ilerleyen yıllarda trafiği ele geçirecek gibi görünüyor. Otomobil üretimi yapan firmalardan biri benzinli ve dizel seçeneği bulunan bir modele elektrikli versiyonunu da eklemiştir. Ancak bu araçların trafikte kullanılabilmesi için öncelikli olarak bazı teknik alt yapılarının oluşması gerekir.

Yakıt olarak, yakarak enerji elde edilmeye çalışılan diğer enerji kaynaklarına biyogaz ve biyokütleyi de eklenebilir. Bunlar da değişik zorluklar nedeniyle pek ilgi görmemiştir.

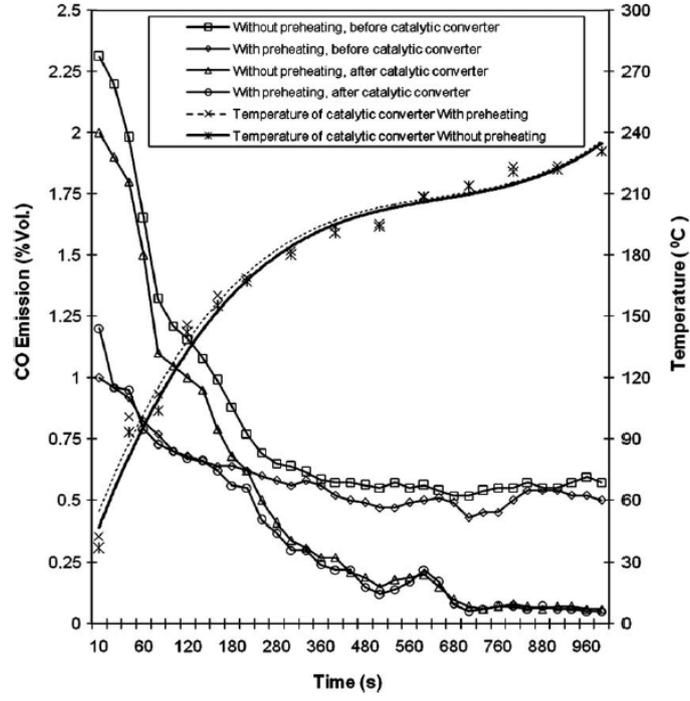
Son zamanlarda önemli olan farklı bir enerji kaynağı olarak nitelendirilen yenilenebilir enerji kaynakları gündemdedir. Bunlar; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidro enerjidir. Bu enerji kaynaklarından faydalanım son yıllarda önemli miktarlardadır. Ülkemizde de bu yenilenebilir enerji kaynaklarına gereken önemi verilmektedir. Ülkemizde güneş enerji tarlaları, rüzgar türbinleri ve hidroelektrik santraller son 10 yıldır hızlı bir şekilde kurulmaya ve kullanılmaya başlanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynağı arayışları devam ederken; bir yandan da fosil kökenli yakıtların yanma sonucu oluşturdukları emisyon ve elde edilen enerji verimliliği odaklı iyileştirme çalışmaları da hızla devam etmektedir.

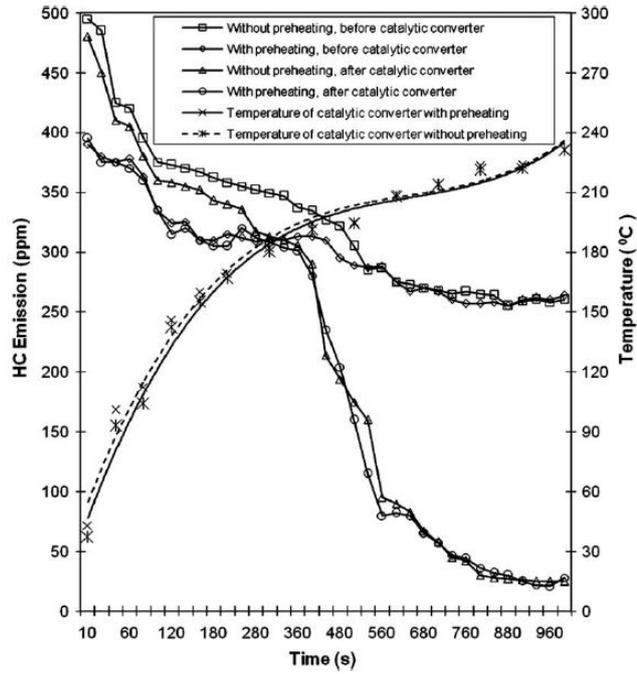
Çanakçı (2008) çalışmasında HCCI motorunu modifiye ederek yüksek performans değerlendirmesi ve emisyon araştırması yapmıştır. Çalışmalarını, benzin motorunu modifiye ederek ağır şartlı dizel motoruna dönüştürmüştür. Elde ettiği DI-HCCI benzin motoruna farklı basınçlarda emme havası göndererek yapmıştır. Testler üç farklı püskürtme basıncında yapılmıştır. Her basınçta maksimum torku elde etmek için farklı bağıntılar elde edilerek performans ve emisyon değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuç olarak maksimum torku elde etmek için yükselen basınç doğrultusunda ateşleme başlangıcı gecikmiştir. Motor torku artan basınçla azalmıştır. Üç farklı basınçta aynı etkiyi alabilmek için yakıt akış hızını ve emme havasını artırmak gerekmiştir. Egzoz gazı sıcaklığı artan basınç ile artmıştır. Yanma verimi üç farklı basınçta da yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Fakat yanma verimliliği ile fren termal verimliliği ters ilişki göstermiştir. CO emisyonu artan basınç ile azalmıştır. HC emisyonu yüksek basınç

modu dışında azalma göstermiştir. NO_x emisyonları ise HC emisyonlarının tersi yönde gelişmiştir. Yanma sıcaklığı düştükçe NO_x emisyonlarında azalma; yanma sıcaklığı yükseldikçe ise NO_x emisyonlarında artma meydana gelmiştir. Performans ve emisyon üzerinde etkili parametrelerin; giriş hava basıncı, termal verimlilik ve yanma verimliliği olduğu kanısına varılmıştır.

Gümüş (2009), çalışmasında çevre kirliliğinde büyük bir etken olan içten yanmalı motorların ilk soğuk çalışmalarının etkisini araştırmak ve emisyonu azaltmak için bir içten yanmalı motor için ön ısıtma düzeneği kurmuştur. Kurmuş olduğu düzenek; bir termal enerji depolama sistemidir. Termal enerji depolama sisteminde enerji depolama işini yüklenecek olan madde bir kimyasal olup $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'dur. Bu maddenin katı fazdan sıvı faza geçmesi için gereken enerji, bu madde ile temas ettirilerek maddenin faz değiştirmesi sağlanmıştır. Dolayısıyla madde faz değiştirirken enerji depolamıştır. Daha sonra bu enerji yüklenmiş olan bu madde tekrar ortam sıcaklığına gelene kadar dış ortama ısı vermeye başlamıştır. Dış ortama ısı verme süresi dış ortam sıcaklığına ve bu maddelerin ısı kapasitesine bağlıdır. Isı kapasitesi yüksek olan maddeler tercih edilir ki ortama ısı verme süresi uzun olsun ve bu da özellikle soğuk bölgeler için motor ilk çalıştırma sıcaklığının mümkün olduğunca yüksek sıcaklıkta olmasını sağlayan bir avantaj haline gelir. Çalışmada kullanılan faz değişim maddesine depolaması için verilecek olan enerji motor soğutma suyundan elde edilmiştir. Motor soğutma suyu faz değiştiren maddenin bulunduğu enerji depolama sisteminden geçirilerek bu maddelerin ısı depolanması sağlanmıştır. Çalışmada enerji depolama sisteminin 12 saat sonraki ısı verimi %57,5 olarak saptanmış olup, CO ve HC emisyonlarının soğuk çalıştırmaya göre; sırasıyla %64 ve %15 olarak azaldığı görülmüştür. Bu ölçümler, katalitik konvertörün giriş ve çıkış noktalarından; ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız olarak yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, deneysel olarak termal enerji depolama sistemi geliştirilmiş olup, içten yanmalı motorlar için ucuz ve bol olarak faz değişim maddesi olarak, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 'nun içten yanmalı motorlarda ön ısıtması için kullanılmasında soğuk çalışma emisyonlarının azaltıldığı kanısı varılmıştır.



Şekil 1.1. Motorun CO emisyon değişimleri (Gümüş 2014)

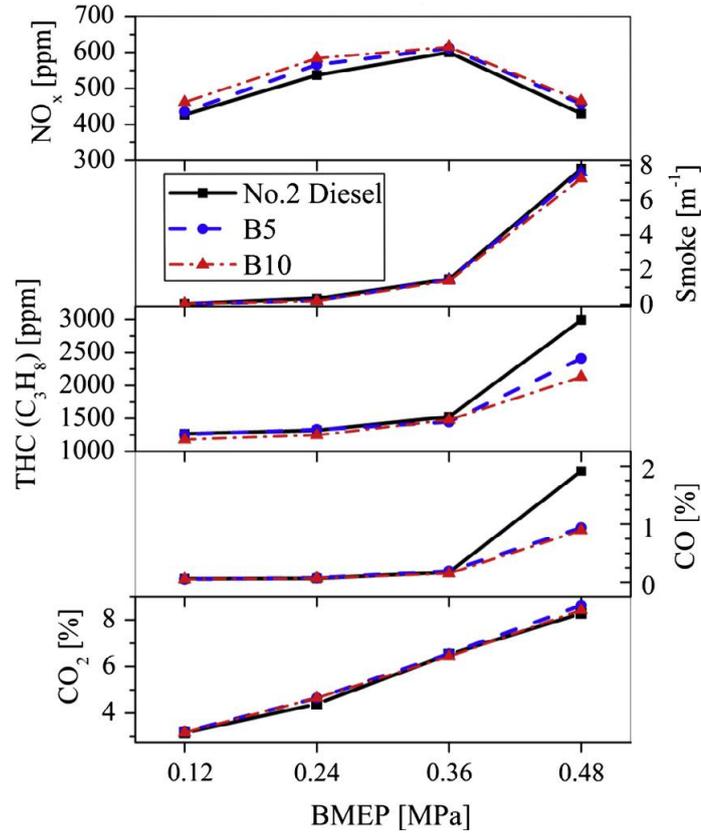


Şekil 1.2. Motorun HC emisyon değişimleri (Gümüş 2014)

Maurya and Agarwal (2014) çalışmalarında modifiye edilmiş bir HCCI motorda etanol ve metanol kullanarak performans ve emisyon araştırması üzerine çalışmışlardır. Deneyle, farklı yakıtlar için farklı sıcaklıkta emme havası ve farklı hava-yakıt oranında yapılmıştır. Yapılan deneyle, silindir içerisindeki ortalama efektif basınç emme havası sıcaklığı ve hava-yakıt oranından etkilenmiştir. Aynı zamanda ortalama efektif basınç, metanol kullanıldığında en yüksek, etanol kullanıldığında daha düşük, benzinde ise en düşük bulunmuştur. Bu kıyas birim miktardaki enerji elde edilme miktarına göre yapılmıştır. Maksimum termal etkinlikler açısından değerlendirildiğinde ise etanol yaklaşık %48,8, benzin yaklaşık %48, metanol ise yaklaşık %45 civarında tespit edilmiştir. Fakat yanma verimi açısından değerlendirildiğinde etanol ve metanol yaklaşık %99 civarında yanarken, benzin yaklaşık %95 kadar yanmaktadır. Yanmayan yakıtın bulunması emisyon açısından iyi değildir. Aynı zamanda benzindeki vuruntu yoğunluğunun, etanol ve metanoldeki vuruntu yoğunluğuna göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bir başka önemlilik arz eden nokta da, normal yanma koşullarına göre değerlendirildiğinde NO_x emisyonlarında azalma gözlenmiştir. Fakat artan silindir içi sıcaklıkla NO_x emisyon oluşum hızında artma meydana geldiği saptanmıştır. HC ve CO emisyonlarının ise normalden daha yüksek olduğu saptanmıştır. Özet olarak, etanol ve metanol HCCI motorlarında iyi sonuçlar göstermiştir ve benzin HCCI motorlarda yedek yakıt olarak kullanılabilir kanısına varılmıştır.

Can (2014) çalışmasında atık yemek yağlarından üretilen biyodizeli hacimsel olarak %5 ve %10 oranlarda dizele karıştırıp, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu ve dört zamanlı bir doğal emişli dizel motorunda, dört farklı motor yükünde (0,48 MPa, 0,36 MPa, 0,24 MPa, 0,12 MPa) yakıt olarak kullanmıştır. Deneylelerini sabit 2200 rpm devirde gerçekleştirmiştir. Yanma ve performans biyodizel ilavesi ile azalmıştır. Bunun yanında silindir içi basınç, biyodizel ilavesi ile düşmüştür. Fakat basıncın krank açısına oranında artmalar meydana gelmiştir. Dolayısıyla krank açısında biyodizel ilavesi ile düşüşler olmuştur. Bir başka durum da ortalama efektif güç değerlerinde sapmalar meydana gelmiştir. Bunların yanında egzoz emisyonları toplamda azalırken NO_x emisyonlarında %8,7'lik bir artış saptanmıştır. Hidrokarbon emisyonları düşük ve orta yüklerde %29'a kadar azaltma gösterirken, bu azalma, yüksek yüklerde %5'lere kadar düşmüştür. CO

emisyonları yüksek yüklerde %5'e varan azalmalar gösterirken, orta ve düşük yüklerde önemli değişimler göstermemiştir. Şekil 1.1'deki grafikten de anlaşılacağı gibi CO₂ emisyonlarında biyodizel ilavesi ile biraz artma gözlenmiştir. CO emisyonunda ise biyodizel ilavesi ile azalma gözlenmiştir.



Şekil 1.3. Farklı motor yüklerinde egzoz emisyonlarına biyodizel etkileri (Özer 2014)

1.1. Teorik Modelleme Esasına Dayanılarak Yapılan Çalışmalar

Torkzadeh *et al.* (2001) çalışmalarında, yanma modellerinin emisyon tahminleri için temel oluşturduklarını söylemişlerdir. Fakat her yanma modeli emisyonları açıklayamamıştır. Örneğin; sıfır-boyutlu modeller hesaplama açısından verimli; fakat emisyonları açıklamaz. En az iki-bölgeli modelin yerel noktalar bazında çözümü, yakıt püskürtme ve buharlaşma modelleri ile iki-bölgeli yanma modelini desteklenirse, emisyon tahminleri yapılabilir şekilde düşünülmüştür. Bu modelin merkezine kimyasal denge oturtulmuştur. Fakat NO_x emisyonları için bir reaksiyon kinetiği

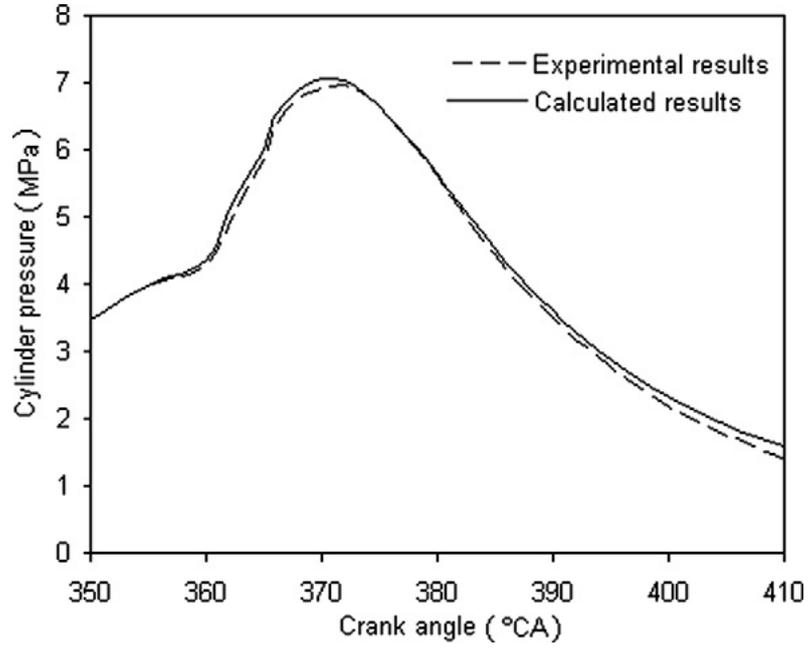
yaklaşımı olan Zeldovich-Yaklaşımı kullanılmıştır. NO_x emisyonları üzerinde egzoz gazı resirkülasyonunun (EGR'nin) etkisi de araştırılmıştır. Modele dayalı hesaplamalar sonucu elde edilen veriler, modelin egzoz emisyonlarının tahmininde kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda EGR, NO_x emisyonunu azaltmıştır.

Faravelli *et al.* (2003) çalışmalarında, düşük sıcaklıklarda bir hidrokarbonun oksidasyonu sırasında NO ile hidrokarbonlar arasındaki etkileşimi araştırmak için genel ve ayrıntılı bir kinetik model geliştirmişlerdir. Çalışmada düşük sıcaklıklardaki etkileşimler incelenmiştir. Hesaplamalar, hidrokarbon oksidasyonun ve düşük konsantrasyonların NO ve NO_2 konsantrasyonlarının oluşumlarında tatminkar sonuçlar olacağını göstermiştir. Bu sonuçlar farklı hidrokarbonlar ve farklı sıcaklıklar için farklı sonuç göstermiştir. Çünkü düşük karbonlu hidrokarbonlar ve alkenler için bu oluşum daha az seviyelerde iken; alkanlarda ve yüksek karbonlularda bu oluşum daha yüksek seviyede tespit edilmiştir. NO ve NO_2 'e dönüşme dereceleri, peroksit köklerinin (özellikle HO_2) üretim hızına ve bazı hidrokarbon radikallerine bağlı olduğu ön görülmüştür. CH_3 ve C_3H_5 alkil kökleri NO ve NO_2 bileşiklerinin oluşumunu azalttığı söylenmiştir. Oluşturulan model sonuçları ile deneysel ölçüm değerleri karşılaştırıldığında, bazı kinetik ve termodinamik parametrelerin daha detaylı araştırılması gerektiği kanısına varılmıştır. Özellikle etilen tepkime kinetik parametreleri, oksijen ve vinil radikalleri arasında önem kazanmaktadır. Peroksit radikaller ile NO, NO_2 arasındaki etkileşimler büyük oranda düşük sıcaklıklarda hidrokarbonların oksidasyonu ile belirlendiği söylenmiştir. Peroksit oluşumu ve tükenmesinin NO ve NO_2 ile etkileşimleri daha fazla teorik ve deneysel araştırmalar gerektirdiği kanısına varılmıştır.

Rakopoulos *et al.* (2004) çalışmalarında, doğrudan enjeksiyonlu bir dizel motoru için iki-bölgeli bir yanma modeli oluşturmuşlardır. Sistemde yakıt-hava jetleri konik bir şekilde dizilmiş bir diziyi ihtiva eder ve tüm enjektörlerin meme delikleri birbirine eşittir. Bu eşit delikler yanma için gerekli olan oksijenin belirlenmesinde etkin rol oynamıştır. Tüm bunlar ve jet karıştırma da dahil olmak üzere tüm sistemin modellenmesi yapılmıştır. Kütle, enerji ve durum denklemlerine göre gereken ısı ve

basınç oluşturularak her iki bölgeye de uygulanmıştır. Egzoz gazlarında bulunan muhtelif azot oksitinin (NO) hesaplanması için kimyasal hız ifadeleri ile birlikte, ele alınan türün C-H-O sistemi için bir kimyasal denge düzeni kabul edilerek hesaplama yapılmıştır. Kurum oluşumu ve oksidasyon oranlarının değerlendirilmesi de yapılmıştır. İlgili bilgisayar programlarının teorik sonuçları, dizel motorlar üzerinde yapılan deneysel ölçüm değerleriyle karşılaştırıldığında; silindir içi basınç ve sıcaklık değerleri, azot oksit konsantrasyonu, kurum yoğunluğu, çeşitli yük ve enjeksiyon zamanlamaları için karşılaştırmalar yapılmıştır. Aynı zamanda hesaplanan değerler ile deneysel ölçüm sonuçları için duyarlılık analizleri de yapılmıştır. Sonuçlar; model verileri ile deneysel olarak ölçülen değerler karşılaştırıldığında, performans ve emisyon tahmin değerlerinin deneysel verilere yakın olduğunu göstermiştir. Sonucun bu şekilde olması, önerilen iki-bölgeli modelin motor performans ve emisyon tahmini için kullanılabilir etkin bir model olduğunu ispatlamıştır. Modelin öngörü yetenekleri güven oluşturduktan sonra, kapsamlı tahminler için modellemeler yapılarak; yakıt hazırlama, reaksiyon alt modellerinde kullanılan sabitlerin değerlerinin değişimleri incelenerek modelin hassasiyeti incelenmiştir. Modelin aynı zamanda hassas bir model olduğu kanısına varılmıştır. Başka bir sonuç olarak değişimi incelenen sabitler reaksiyonların fiziksel mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır.

Qi *et al.* (2011) çalışmalarında, bir dizel motorunun performansını yarı-boyutlu yanma modeli simülasyonu yardımıyla araştırıp, gerçek çevrim performansı ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmayı yaparken yarı-boyutlu yanma modelinin hassasiyetini artırmak için faz bölünmüş sprey karışım modelini önermişlerdir. Yazılım Matlab/Simulink alt programında oluşturulmuştur. Oluşturulan yanma modeli ile deneysel veriler karşılaştırılıp, hata analizi yapılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu; güç ve frene özgü güç tüketimi hata oranı %2,8 olduğu, azot oksit ve kurum emisyonlarının hata oranı %9,1 olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 1.4. Deneysel ve hesaplamalı silindir içi basınç eğrileri (Kunpeng *et al.* 2011)

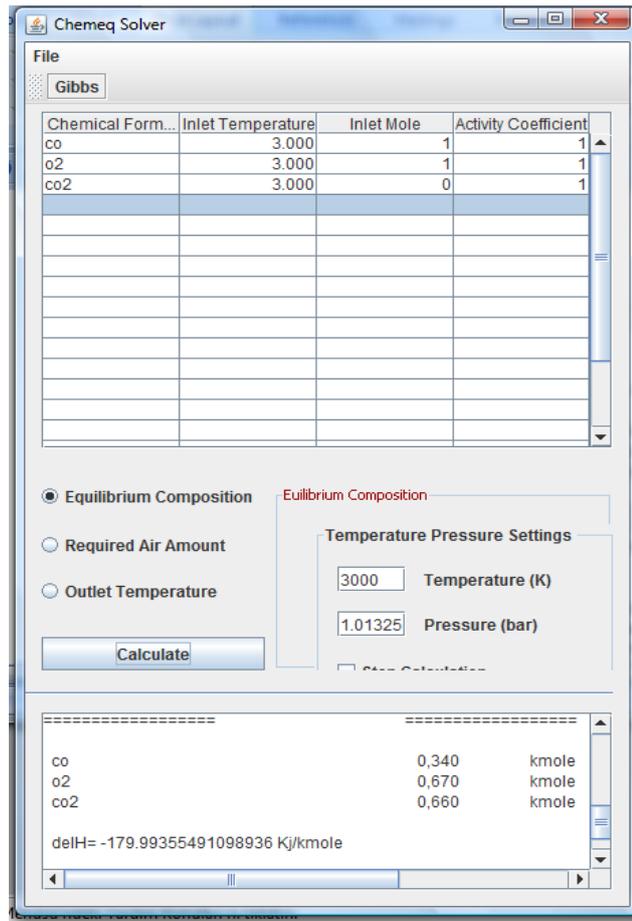
Yapılan çalışmanın, deneysel veriler ile karşılaştırıldığında verimli bir çalışma olduğu kanısına varılmıştır. Gerçek çevrime çok yakın olduğu ön görülmüştür. Fakat hataları daha da azaltmak için hava sürüklenme dönemi de hesaba alınmalıdır. Hava sürüklenme dönemi için uygun bir model seçilmeli ve hesaplara dahil edilmelidir sonucuna varılmıştır.

Truffin and Colin (2011) çalışmalarında, motora reaktif akışının simülasyonu için sıcaklık dalgalanmalı modelini kullanmışlardır. Bu sıcaklık dalgalanma modeli denklemi; Truffin, Benkenida ve Colin, Benkenida ve ECFM3Z yanma denklemi birleşiminden oluşmuştur. Özellikle, bu çalışma Knop ve Jay ateşleme modeli için Tablo Kinetiği'nin otomatik ateşleme süreciyle ilgili olan kısmından faydalanır. Tablo Kinetiği, bir tahmin yöntemi olan Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu yaklaşımı ile elde edilen reaksiyon oranları ile sıcaklık dalgalanmalarını birleştiren bir tablolama yöntemidir. Bu model Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu'nun formülasyonu sayesinde, termal karışma ve/veya duvar ısı kayıpları ile oluşabilen sıcaklık dalgalanmalarının yeterli bir tahmin imkanı sunmaktadır. Bu çalışma için Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu, pistonlu motorlarda uzay ve zaman içinde değişebilir sıcaklık dağılımını temsil edebilir

düşüncesiyle kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar; otomatik ateşleme üst ölü noktası yakınında meydana gelmeden önce güçlü sıcaklık farklılıkları meydana gelmiştir. Bu sıcaklık farklılıkları yanma odasının merkezine türbülans ve konveksiyon yoluyla taşınmıştır. Yanma odasının merkezinde; taze gazlar ile yanmış gazların karışımı homojendir. Sıcaklık iniş ve çıkışlarındaki gaz karışımları ise heterojendir. İlk silindir ısılarında oluşan sıcaklık farklılıkları modelin kullanılabilirliğini zayıflatmıştır. Testler sıcaklık dalgalanmasının ve duvar ısı kayıplarının, otomatik ateşleme modelinde kilit parametreler olduğunu göstermiştir. Bu çalışma aynı zamanda, otomatik ateşlemedeki gecikmeler için koşulların belirlenmesinde, ateşleme kinetik değerleri için tabloların önemini ortaya koymuştur. Üç boyutlu öz tutuşma modelinin daha da doğrulanması için sıcaklık alanları ve deneyler ile karşılaştırma yapıp desteklenmesi gerekmektedir kanısının varılmıştır.

Vujovic (2011) çalışmasında, bir fosil yakıtın yüksek sıcaklıkta yanması sonucu oluşan yanma ürünleri için karmaşık denge kompozisyonlarının hesaplanması için bir bilgisayar programı hazırlamıştır. Çalışmada yüksek sıcaklıkta yanma ürünlerinin kompozisyonlarının belirlenmesinde Gibbs Serbest Enerjisi Minimizasyonu metodu kullanılmıştır. Çözülecek denklemlerin sayısı, varyasyon ilkeleri ve geometrik programlama için, elementler ile fazlar arasında kurulan denklemlerin toplamalarının eşitlik ilkesine dayanılarak indirgenmiştir. Metodolojiye dayalı oluşturulan denklemler, Blau Programı yardımıyla çözülmüştür. Program, bir sayısal yöntem olan Newton-Raphson metodunu içerir. Sonuç olarak; Gibbs Serbest Enerji Minimizasyonu yöntemi gerekli olan denklemlerin azaltılmasına olanak sağladığı görülmüştür. Bu yöntem lineer olmayan çok değişkenli bu tip denklem sistemlerinin çözümü için Lagrange Çarpanları yardımıyla gaz, sıvı, katı ve yanma ürünlerinin kompozisyonları için çözüm üretmiştir. Elde edilen sonuçlar Rusya Moskova' da bulunan IVTAN Enstitüsü'nün sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Enstitü sonuçları ile bilgisayar programının ürettiği sonuçlar arasında önemli farklılıklar bulunmamıştır. Oluşturulan programın yüksek sıcaklıkta fosil yakıtların yanması sonucu oluşan yanma ürünlerinin hesaplanmasında kullanılabilir bir program olduğu kanısına varılmıştır.

Çoban (2014), çalışmasında kimyasal dengenin hesaplanmasını yakıt pili dönüşümleri de dahil olmak üzere bir çok enerji sisteminin irdelenmesinde önemli olduğunu söyleyerek; kimyasal dengenin Gibbs Serbest Enerjisi Minimizasyonu Metodu ile modellenmesini çalışmıştır. Bu yöntemde kimyasal dengenin oluşabilmesi için gereken şart reaksiyondaki tüm gazların Gibbs serbest enerji toplamalarının minimum olmasından yola çıkarak ve bu enerji toplamalarının sıfır olduğu noktanın bulunması üzerine kimyasal eşitlikler elde etmiştir. Elde edilen bu eşitlikler lineer denklem sistemleridir ve bu denklem sistemleri farklı metotlar ile çözüme kavuşturulmaktadır. Bu çalışmada NASA yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen kimyasal denge eşitlikleri NASA yöntemine uyarlanmıştır. Modelleme bileşenleri, bilgisayar programlarından java programlama dilinde oluşturulup çözülmüştür.



Şekil 1.5. Gibbs.java programı grafik çıktısı veren rgui.java programı (Çoban)

Oluşturulan NASA optimizasyon modeli ile Gibbs Serbest Enerjisi Minimizasyonu hesapları doğru bir şekilde yapılmaktadır. Çalışmada İdeal Gaz ve Lee-Kesler gerçek hal denklemleri kullanılmıştır. Kimyasal denge (Gibbs serbest enerjisini minimizasyonu) birçok yanma reaksiyonu analizi için temel bir araç olarak kullanılabilir kanısına varılmıştır.

1.2. Amaç

Bu çalışmada, kimyasal denge esaslarından faydalanılarak yanmanın, düşük ve yüksek sıcaklıklarda termodinamik ve iki-alanlı çevrim modellemesi yapılmıştır. Bu modelleme sonucu elde edilen denklemler, Matlab ortamında çözülmüştür. Ardından Matlab Graphical User Interface (GUI) kullanılarak, bir kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Hesaplamalar için bu kullanıcı ara yüzü kullanılacaktır. Arka planda çalışan Matlab programına, kullanıcı tarafından herhangi bir müdahale olmaksızın, direkt olarak GUI'den değişken parametrelerin değiştirilerek, istenilen sıcaklığa ait ve değişken basınç altında bileşenlerin termokimyasal özelliklerinin, değişimleri grafiksel olarak sunulmuştur.

Aynı zamanda oluşturulan bu grafiksel sunum, istenilen özelliğin ve/veya özelliklerinin grafiklerini aktif etmekte, istenmeyen grafikler ise pasif durumdadır.

Bu çalışmanın başka bir özelliği de yanma sonu ürünlerinin kompozisyonuna bakarak emisyon tahminlerinin yapılmasını sağlamasıdır.

Pratik olarak yanmanın modellenmesi, kompleks denklem sistemleri ile kullanıcıyı birebir uğraştırmadan, kısa zamanda yanma hesaplamalarının yapılabilmesini, grafikler bazında anlaşılma kolaylığı sağlanmasını ve bu grafiklerden yola çıkılarak yaklaşık emisyon tahminlerinde bulunabilme amaçları güdülerek bu çalışma yapılmıştır.

1.3. Kapsam

Günümüzde yanmanın her proste yoğun bir şekilde kullanılmaya başlamasıyla oluşan emisyon her geçen gün artmaktadır. Bilim adamları, yanmanın iyileştirilmesi ve emisyonların azaltılması konusunda sürekli araştırmalar yapmaktadırlar. Yanma spesifik bir konu olup teorik olarak anlaşılması zor bir konudur. Biz hesaplamalar yaparken, bir takım kabuller yaparak hesaplamaları yaparız. Fakat işin içine girildiği zaman yanma problemleri üzerinde birçok parametre etkilidir. Aynı zamanda yanma denklemlerinin çözümü hem zor hem de zaman almaktadır. Bu çalışma kapsamında spesifik olan yanma ile ilgili teorik hesaplamalar yapıldı ve kompleks denklemlerin bir bilgisayar programlama dili kullanılarak çok kısa sürelerde çözümünü mümkün kılmaya çalışıldı. Buna ilaveten aynı programlama dilinin grafik ara yüzü kullanılarak kullanıcı tarafından, programın pratik olarak kullanılabilmesi sağlanmaya çalışıldı. Devamında grafiksel sunum ortamında emisyon üzerinde etkili parametrelerin değişimi ile emisyonların değişimlerinin de kısa sürelerde grafiksel yolla ön görülmesi sağlanmaya çalışıldı.

2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde yanma ile ilgili detaylar incelenmiştir. Yanma, yanma sonu ürünler, enerji ve kütle dengeleri, yanma sonucu oluşan emisyon, yanmanın modellenmesi gibi kavramlar üzerinde durulmuştur.

2.1. Yanma

Yakıt adı verilen ve uygun şartlar sağlandığında, oksijen ile reaksiyon vermesi sonucu dış ortama enerji veren maddelerin, oksijen ile etkileşimine yanma, meydana gelen reaksiyona da yanma reaksiyonu denilmektedir. Yanma olayı kimyasal bir işlemdir. Yanma reaksiyonları oksidasyon olarak da adlandırılmaktadır. Tanımda anlatıldığı gibi yanma reaksiyonları dış ortama enerji verdikleri için egzotermik reaksiyon grubuna girerler. Oluşan enerji reaksiyon esnasında yakıtın içerisinde moleküller ve/veya elementler arasındaki kimyasal bağların parçalanması ile oluşmaktadır. Çünkü kimyasal bağlar enerji yüklüdürler.

Yanma olayı, yakıt ile oksijenin bir araya getirilmesi ile oluşmaz. Çünkü ilgili yakıtın kendine özel bir tutuşma sıcaklığı vardır ki; eğer yanma prosesinde yakıt bu tutuşma sıcaklığına gelmezse yanma işlemi başlamaz. Aynı zamanda, yanma reaksiyonuna yetebilecek miktarda oksijenin ortamda bulunması ve yanma reaksiyonu sonucu oluşan egzoz gazlarının prosesden uzaklaştırılması için yeterli ölçülerde bacanın mevcudiyeti yanma için gereklidir. Bu faktörler tamamen birbirine bağlıdır ve biri olmazsa diğerleri anlam ifade etmezler.

Her yakıtın kendine özgü bir tutuşma sıcaklığı vardır. Dolayısıyla yakıttan yakıtta yanma için gereken şartlar değişmektedir. Dolayısıyla yanma prosesinin şartları belirlenirken yakıtın özelliklerinin bilinmesi gerekir.

2.2. Yakıtlar

Isı enerjisi verebilecek şekilde yanabilen herhangi bir maddeye yakıt denir. En iyi bilinen yakıtlar, esas olarak hidrojen ve karbondan meydana gelir. Bunlara hidrokarbon denir ve C_nH_m genel formülü ile gösterilirler. Hidrokarbonlar her fazda yakıt olarak bulunurlar. Örnek olarak kömür, gaz yağı ve doğal gaz verilebilir.

Kömürün ana bileşeni karbondur. Kömür değişen miktarlarda oksijen, hidrojen, azot, kükürt, nem ve kül içerir. Bileşimi bir coğrafik bölgeden diğerine, hatta aynı coğrafik bölge içinde bile, önemli ölçüde değişebildiği için kömürün tam bir kütle analizini vermek çok zordur.

Sıvı hidrokarbon yakıtların çoğu birkaç hidrokarbonun bir karışımıdır ve ham petrolden damıtma ile elde edilir. Damıtma sisteminde en uçucu hidrokarbon ilk önce buharlaşır ve benzin elde edilir. Damıtma ile elde edilen daha az uçucu hidrokarbon gaz yağı, mazot ve kalyaktır. Belirli bir hidrokarbonun bileşimi rafineri kadar ham petrole de bağlıdır.

Sıvı hidrokarbonlar yakıtlar çok farklı hidrokarbonların bir karışımı olmasına rağmen, genellikle kolaylık olsun diye tek bir hidrokarbon olarak düşünülür. Örneğin, benzin oktan C_8H_{18} , olarak mazot $C_{12}H_{26}$ dodekan olarak işlem görür. Çok bilinen diğer sıvı hidrokarbon, metanol de denilen metil alkol, CH_3OH , de yakıt olarak karışımlarda kullanılır.

Gaz hidrokarbon yakıtlardan olan doğalgaz, metan ve az miktarda diğer gazların bir karışımıdır ve sık sık basit olsun diye metan, CH_4 olarak işlem görür. Doğal gaz ya gaz kuyularından veya doğal gaz bakımından zengin petrol kuyularından elde edilir. Doğal gaz esas olarak metandan oluşmaktadır, ama az miktarlarda etan, propan, hidrojen, helyum, karbon dioksit, azot, hidrojen sülfür ve su buharı da içerir.

Taşıtlarda, ya 150-250 atmosfer basınç altındaki CNG (Compressed Natural Gas) olarak gaz fazında ya da -162°C 'de LNG (Liquefied Natural Gas) olarak sıvı fazda depolanır. Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) doğal gaz prosesinde veya petrol arıtmasında elde edilen bir yan üründür. LPG esas olarak yaklaşık %90 oranında propandan oluşur ve bu yüzden genel olarak propan olarak kabul edilir.

2.3. Yanma Kimyası

Yanma kimyasal olarak, karbonun ve hidrojenin oksitlenmesi olarak tanımlanmaktadır.



Şeklinde karbonun yanması gerçekleşirken;



Şeklinde de hidrojenin yanması gerçekleşir.

Yanma olaylarında genellikle havanın içerisinde bulunan serbest oksijen kullanılır. Havanın içerisindeki serbest oksijenin kullanılma amaçları;

- Her ortamda havanın mevcut olması,
- Havadan oksijen temininde herhangi bir maliyet olmaması,
- Yanma prosesinde oksijenin elde edilmesi için prosese ilave yatırım yapılmamasıdır.

Hava hacimsel bileşim olarak aşağıdaki gazlardan oluşmaktadır.

- Oksijen : %20,94
- Azot : %78,08
- Argon : %0,93

- Karbondioksit : %0,03
- Diğer gazlar : %0,02

Yanma hesaplamalarında, havanın içerisinde sadece oksijen ve azot gazlarının olduğunu varsayarak hesaplamalar yapılır. Oksijen dışındaki diğer gazlar da inert azot gazı gibi düşünülür. Bu kabul hesapların kolay yapılmasını sağlar. Oksijen ve azot gazı dışındaki gazların hacimsel oranlarına bakıldığı zaman ciddi mertebelerde ehemmiyet göstermemektedirler. Dolayısıyla yapılan bu kabul hesaplarda ciddi sapmalara neden olmamaktadır. O halde yapılan kabuller sonucu havanın bileşimi şöyle düşünebilir:

- Oksijen : %20,94
- Azot : %79,06

Daha yüzeysel hesaplarda, hacimsel oranlar; %21 oksijen, %79 azot kabul edilir.

Hava ideal gaz olarak kabul edilmektedir. İdeal Gaz Yasasına göre; ideal gazların hacimsel oranları mol oranlarına eşittir. Dolayısıyla hava 0,21 mol oksijen, 0,79 mol azot gazı içermektedir. Buradan hareketle hesaplama yapılırsa:

1 mol havada 0,21 mol oksijen varsa; 1 mol oksijen; $\frac{1}{0,21} = 4,76$ mol havanın içerisinde bulunmaktadır. 4,76 mol havanın içerisindeki azot gazı: $4,76 - 1 = 3,76$ mol olarak bulunur.

Karışımların molekül ağırlığının hesabından hareketle havanın molekül ağırlığı hesaplanırsa:

$$V_{\text{oksijen}} \times M_{\text{oksijen}} + V_{\text{azot}} \times M_{\text{azot}} = V_{\text{hava}} \times M_{\text{hava}} \quad (2.3)$$

V_{oksijen} = hava içerisindeki oksijenin hacimsel oranı,

M_{oksijen} = oksijenin molekül ağırlığı: 32 g/mol,

V_{azot} = hava içerisindeki azotun hacimsel oranı,

M_{azot} = azotun moleküler ağırlığı: 28 g/mol,

V_{hava} = havanın hacimsel oranı,

M_{hava} = havanın moleküler ağırlığı, (hesaplanacaktır.)

Eldeki veriler denklem (2.3)'te yerine yazılırsa:

$$0,2094 \times 32 + 0,7906 \times 28 = 1 \times M_{oksijen} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'ten;

$M_{oksijen} = 28,84$ g/mol olarak hesaplanır.

Eğer havanın içerisindeki oksijen ve azotun kütleli kesirlerini ($X_{oksijen}, X_{azot}$) hesaplanmak istenirse;

$$X_{oksijen} = \frac{V_{oksijen} \times M_{oksijen}}{M_{hava}} \quad (2.6)$$

$$X_{azot} = \frac{V_{azot} \times M_{azot}}{M_{hava}}$$

(2.7)

(2.6) ve (2.7) numaralı denklemlerde biline değerler yerine yazılıp denklemler çözüldüğünde $X_{oksijen} = 0,23$, $X_{azot} = 0,77$ olarak bulunur.

2.3.1. Stokiyometrik hava

Bir yakıtın tam olarak yanabilmesi için gerekli olan minimum hava miktarıdır. Yanma reaksiyonlarında stokiyometrik hava miktarı soru çözümlerinde ya sorunun içerisinde verilir ya da hesaplanması istenir. Eğer hesaplanması isteniyorsa ve hesaplama için

yanma ürünlerinin bilgileri de verilmişse; yanma reaksiyonu, girenler ve oluşanlar şeklinde detaylı bir şekilde yazılır ve denklemin her iki tarafı denkleştirilir. Daha sonra atom denkliği yazılarak eşitlikler oluşturulur. Oluşturulan bu eşitlikler denklem takımı çözüm yöntemleri ile çözümlenerek stokiometrik hava miktarı hesaplanır.

2.3.2. Hava fazlalık katsayısı (λ)

Yanma reaksiyonlarında yakıtın yanması için kullanılan hava miktarının, kullanılması gereken minimum hava miktarına yani stokiometrik hava miktarına oranı olarak tanımlanır. Hava fazlalık katsayısı (λ) yanmanın verimliliği ve yanma sonu ürünleri hakkında bilgiler verir. Örneğin; hava fazlalık katsayısı 1'den büyük olduğu durumlarda, yanma için gerekenden fazla hava verilmiştir. Dolayısıyla yakıt yanma sonunda tamamen tükenmiştir ön görüşü yapılabilir. Tam tersi durumda ise ortamda hala yanabilecek yakıt olabilir ön görüşü yapılır.

2.3.3. Tam yanma

Yanma reaksiyonunda yakıtın tamamen yanabilmesi için gereken miktarda hava verilirse sisteme, yakıt tamamen yanabilir. Tam yanma ideal bir durumdur. Yanma proseslerinde bir kriter olarak düşünülerek, bu ideal duruma yaklaşılmaya çalışılır.

Tam yanma sonucunda oluşan yanma ürünleri: karbon dioksit (CO_2), su veya su buharı (H_2O), azot (N_2) ve azot oksitler (NO_x); eğer yakıtın bünyesinde safsızlık maddeleri varsa, kükürt oksitler (SO_x), hidrojen sülfür (H_2S) ve partikül maddeler oluşur.

Yanma proseslerinde, yakıtın tam yanabilmesi için gereken hava miktarından biraz fazla hava sisteme gönderilerek yanma işlemi gerçekleştirilir. Çünkü yakıtın tamamının yanması istenir ki maksimum enerji elde edilebilsin. Yakma havası çok fazla da gönderilirse; havanın içerisindeki azot gazı inert bir gazdır ve tepkimeye girip etkilenmeden çıkar, ama bünyesine ısı alarak sistemden enerji kaybolmasına neden olur.

Bu durum istenmeyen bir durum olduğu için yakma hava %10 ile %30 dolaylarında fazladan sisteme gönderilir.

2.3.4. Zengin yanma

Yanma reaksiyonlarında, yakıtın tamamen yanabilmesi için gereken stokiometrik hava miktarından daha az hava sisteme gönderildiğinde meydana gelen yanma zengin bir yanmadır. Böyle bir yanma olayında yakıtın tamamı yanmaya katılamaz. Dolayısıyla verimli bir yanma gerçekleşmez ve yakıtın enerjisinden maksimum seviyede yararlanılamaz. Aynı zamanda zengin yanma emisyon arttırıcı bir etki de yapmaktadır.

Zengin yanma sonucu oluşan ürünler; karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), hidrojen (H₂), su veya su buharı (H₂O), azot monoksit (NO) hidrokarbonlar (HC); eğer yakıtın bünyesinde safsızlık maddeleri varsa, hidrojen sülfür (H₂S), kükürt oksitler (SO_x), partikül maddeler oluşur.

2.3.5. Fakir yanma

Yanma reaksiyonlarında, yakıtın tamamen yanabilmesi için gereken hava miktarından fazla havanın sisteme gönderildiğinde meydana gelen yanma işlemi fakir bir yanma reaksiyonudur.

Fakir yanma işlemine ilk bakıldığında zararsız gibi görünmektedir. Emisyon bakımından böyle düşünülebilir. Fakat enerji verimliliği bakımından bakıldığında inert gaz olan azot gazı bünyesine enerji alarak sistemden egzoz gazıyla birlikte daha fazla ısı çekilmesine sebebiyet vermektedir. Sonuç olarak yakıttan elde edilen enerjinin bir kısmı bu yolla kaybedilmektedir. Fazla hava ile yanma işleminde, yanma sonu ürünler arasında serbest olarak bulunan oksijen ile yüksek sıcaklıklı proseslerde tepkime verme eğilimi başlayan azot, birbirleriyle tepkimeye girerler. Bu tepkimeler sonucu olan azot oksitlerin çevre emisyonları yüksektir. Böyle bir durumda emisyon standartları açısından istenmeyen bir durumdur.

2.3.6. Hava-yakıt oranı

Yanma prosesinde yanma işlemine giren hava kütesinin, yanma işlemine giren yakıtın kütesine oranı hava/yakıt oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$H/Y \text{ oranı} = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} \quad (2.8)$$

2.3.7. Yakıt-hava oranı

Yanma işlemlerinde, birim havanın yakmış olduğu yakıt miktarına da yakıt/hava oranı denir.

$$Y/H \text{ oranı} = \frac{m_{yakıt}}{m_{hava}} \quad (2.9)$$

2.4. Yanma Stokiyometrisi

Bu bölümde yanıcı karışımlarda, reaktanların (reaksiyona giren maddelerin) ve ürünlerin bileşimi arasındaki ilişkiler anlatılmıştır. Bu ilişkilerde, tepkimeye boyunca kütle kaybı söz konusu olmaz. Dolayısıyla nükleer reaksiyon ve radyoaktif bozunmanın olmadığı reaksiyonlarda Kütle Korunumu Yasası temel alınır ve tüm hesaplar bu yasaya göre yapılır.

Eğer yanma odasında yeterli miktarda oksijen (O_2) mevcut ise; hidrokarbon yakıtın tamamının oksidasyonu gerçekleşebilir. Yanma esnasında, hidrokarbon yakıtın bünyesindeki karbonlar karbon dioksit (CO_2 'e), hidrojenler suya (H_2O 'ya) dönüşür. Örnek olarak, 1 mol propanın (C_3H_8 'in) genel yanma denklemi incelenirse;



Karbon için kütle balansı yazılırsa; $3 = b$,

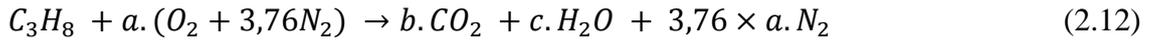
Hidrojen için kütle balansı yazılırsa; $8 = 2 \times c$, $c = 4$,

Oksijen için kütle balansı yazılırsa; $2 \times a = 2 \times b + c$, $2 \times a = 2 \times 3 + 4$, $a = 5$ bulunur. O halde bilinmeyenler yerine yazılırsa denklem aşağıdaki şekilde denkleştirilmiş olur.

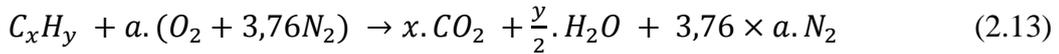


Denklem (2.11) sadece sade bir yanma denkleminin denkleştirilmesini göstermektedir. Fakat yanma reaksiyonları, bu kadar basit değildir. Konular ilerledikçe, kompleks reaksiyonlarla ilgilenilecektir.

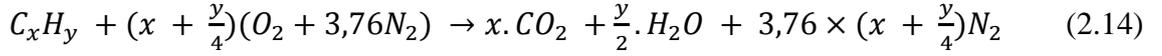
Yukarıdaki propanın yanması reaksiyonuna dikkat edilirse (denklem 2.10 ve 2.11), hidrokarbonun yakılmasında oksijen kullanılmaktadır. Fakat daha önce de bahsedildiği üzere yanma reaksiyonlarında havanın içerisindeki oksijenden faydalanılır. Havanın kimyasal bileşimi de incelenmişti. Havanın içerisinde oksijenin yanında önemli miktarda azot da (N_2) bulunmaktadır. Havanın içerisindeki azot düşük sıcaklıklı yanma reaksiyonlarında inerttir ve reaksiyona girip, etkilenmeden reaksiyondan egzoz gazıyla birlikte dışarı atılır. Propanın hava ile yakılması incelenirse;



Denklem (2.12)'de kütle denkliği oluşturulursa; $a = b + \frac{c}{2}$ 'ye eşit olur. O zaman bir hidrokarbonun genel yanma denkliği yazılırsa;



(2.12) numaralı denklemdeki b ve c değerlerini (2.13) numaralı denklemdeki x ve $\frac{y}{2}$ 'ye eşitliğini kabul edersek; $a = x + \frac{y}{4}$ 'ye dönüşür. O halde daha genel bir denklem yazılabilir.



(2.14) numaralı denklemi, bünyesinde sadece karbon ve hidrojen bulunan tüm hidrokarbonlara uygulanabilir. Eğer hidrokarbonun bünyesinde safsızlık maddeleri varsa (kükürt (S), azot (N) vs.) denklem (2.9) için kurulan kütle balanslarına ilaveten ilgili safsızlık maddeleri için de kütle balansları kurulması gerekir. Aksi halde kütle balansları denklem takımının çözümü mümkün olmamaktadır.

Denklem (2.14)'e bakıldığı zaman yanma reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken oksijen miktarı yakıtın bileşimine göre değişmektedir denilebilir. Dolayısıyla yanma prosesleri için yakma havası temin edilirken yakıtın kimyasal bileşimini göz önünde bulundurmak gerekir. İşte bu noktada hava/yakıt oranı işin içine girmektedir.

Denklem (2.8)'a bakarsak eğer; hava/yakıt oranı hesabı için, denklem (2.14)'teki hidrokarbon katsayıları bazında bir formül türetilir.

$$H/Y \text{ oranı} = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} = \frac{(x + \frac{y}{4}) \times (32 + 3,76 \times 28)}{(x \times 12 + y \times 1)} \quad (2.15)$$

Aynı şekilde denklem (2.9)'da hidrokarbon katsayıları bazında formüle edilebilir.

$$Y/H \text{ oranı} = \frac{m_{yakıt}}{m_{hava}} = \frac{(x \times 12 + y \times 1)}{(x + \frac{y}{4}) \times (32 + 3,76 \times 28)} \quad (2.16)$$

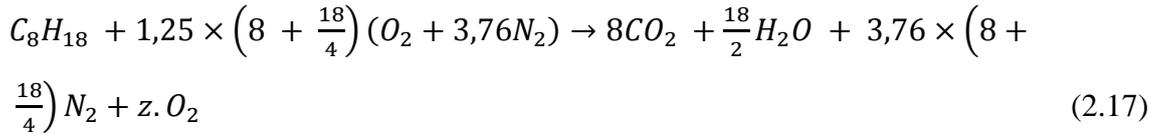
Denklem (2.14) hesaplanan hava miktarı; ilgili yakıtın tamamen yanabilmesi için gereken minimum hava miktarıdır. Yani tam yanma için gereken hava miktarıdır.

Yanma proseslerinde yakıt-hava karışımlarında gereken hava miktarından daha fazla hava veya gereken hava miktarından daha az miktarda hava bulunabilir. Dolayısıyla yanma ile ilgili problemlerde ilk olarak yapılması gereken ilk iş, problemde verilen veriler doğrultusunda yakıtın tam yanması için gereken hava miktarının yani

stokiyometrik hava miktarının hesaplanmasıdır. Devamında da hava fazlalık katsayısının hesaplanması gerekir. Hava fazlalık katsayısı (λ) bize yanmada kullanılan hava-yakıt karışımı ile ilgili bilgiler verir.

Örneğin; %25 fazla hava ile yakılan izo-oktan incelenirse: (C_8H_{18})

Burada en önemli husus elimizde izo-oktanın yanma denklemi yoktur. Fakat soru bize bir takım ip uçları vermektedir. %25 hava fazlası derken, yakıtın yanmasında karbon ve hidrojenin doyumluğundan fazla oksijen var demektir. Dolayısıyla yanma ürünleri arasında O_2 'de vardır. Yakıtın bünyesindeki denklem (14)'e göre x ve y katsayıları sırasıyla, 8 ve 18'dir. Denklem (14)'te yerine yazılırsa,



Denklem (2.17)'deki $z = 0,25 \times \left(8 + \frac{18}{4}\right) = 3,125$ olarak hesaplanır.

Verilen örnek yakıt yönünden fakir bir yanma, hava yönünden ise zengin bir yanma örneğidir. Yani verilen örnekteki hava-yakıt karışımında yakıt yanma esnasında havanın içerisindeki tüm oksijeni bağlayamamaktadır ve fazla oksijeni egzoz gazlarıyla atmosfere salmaktadır.

Yanma verimliliği açısından, hava-yakıt karışımında havanın stokiyometrik hava miktarından daha fazla olması iyidir. Çünkü yanma esnasında yakıtın tamamının yanma ihtimali çok yüksektir.

Eğer hava-yakıt karışımında bulunan hava stokiyometrik hava miktarından daha az miktarda ise yanma ürünleri arasında oksidasyonunu kimyasal yükü oranında tamamlayamamış, yani eksik yanmış bileşikler bulunacaktır. Aynı zamanda yakıtın tamamının okside olması mümkün değildir. Yakıt fazlasının ve eksik yanmış yanma

ürünlerinin egzoz gazı ile atmosfere salınımı emisyon açısından çok zararlıdır. Dolayısıyla yanma proseslerinde emisyon açısından, yakma havası miktarı, stokiometrik hava miktarından fazla olması, eksik olmasından daha iyidir. Dolayısıyla yanma sistemi tasarımlarında stokiometrik hava miktarı kesinlikle yapılmalıdır.

Yanma ürünleri bileşimi, yakıt yönünden fakir ve zengin karışımlarda önemli ölçülerde farklılık gösterdiğinden dolayı, hava-yakıt karışımlarından bahsedilirken, stokiometrik yakıt/hava oranının, gerçek yakıt/hava oranına oranı olarak tanımlanan yakıt/hava eşdeğerlik oranı daha açıklayıcı bir parametredir. Eküvalans oranı olarak da bilinen bu parametre (ϕ) simgesi ile gösterilmektedir. Hava fazlalık katsayısı (λ)'nın tersi olarak da tanımlanan eküvalans oranı (ϕ),

$$\phi = \frac{\left(\frac{m_{yakıt}}{m_{hava}}\right)_{gerçek}}{\left(\frac{m_{yakıt}}{m_{hava}}\right)_{stokio.}} \quad (2.18)$$

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \quad (2.19)$$

Denklem (2.18 ve 2.19)'deki gibi formüle edilir.

Buradan yola çıkarak hava fazlalık katsayısı (λ) ile eküvalans oranı (ϕ) arasındaki ilişki,

Yakıt yönünden fakir karışımlarda; $\phi < 1, \lambda > 1,$

Stokiometrik karışımlarda; $\phi = 1 = \lambda,$

Yakıt yönünden zengin karışımlarda; $\phi > 1, \lambda < 1,$

şeklinde ifade edilir.

2.5. Yanma ve Termodinamiğin Birinci Yasası

Yanma işlemlerinde; yakıt ve oksitleyici, farklı bileşimlerde ürünler üretmek için tepkimeye sokulurlar. Bu dönüşümün gerçek mekanizması, hidrojen ve metan gibi basit yakıtların tepkimeleriyle anlaşılabilir. Fakat daha karmaşık yapıya sahip yakıtların dönüşüm mekanizmalarının detayları tanımlanmış değildir. Bununla birlikte Termodinamiğin Birinci Yasası, bir yanma süreci ile karışımların son durumlarını ilişkilendirmede kullanılabilir.

Termodinamiğin Birinci Yasası, iç enerji, entalpi, ısı ve iş transferi etkileşimleriyle ilgili bir yasadır. Kimyasal bir sisteme Birinci Yasa uygulanırken kompozisyon değişimleriyle ilgili her bir türün sıfır referans hali belirtilmelidir. Yani kimyasal bir sistemde reaksiyona giren ve reaksiyondan çıkan ürünlerin başlangıç hali ile son hali arasındaki değişimin birim kütle başına hesabı yapılırken Birinci Yasa uygulanır.

Termodinamiğin Birinci Yasası;

Enerji Değişimi = Ürünlerin Enerjisi – Girenlerin Enerjisi

$$\Delta E_{sistem} = E_{\dot{u}} - E_{\dot{g}} \quad (2.20)$$

Sistemin enerji değişimi ürünlerin iç (duyulur, gizli, kimyasal ve nükleer), kinetik ve potansiyel, elektrik ve manyetik enerjilerinin değişimleri toplamıdır. Kimyasal reaksiyonlarda elektrik ve manyetik bir etki olmadığı için ihmal edilirse enerji değişimi,

$$\Delta E_{sistem} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (2.21)$$

Uygulamada karşılaşılan sistemlerin çoğu hareketsiz olduğu için hızlarında ve konumlarında bir değişim meydana gelmez. Dolayısıyla sistemin kinetik ve potansiyel enerjisinde herhangi bir değişim meydana gelmez. Bu doğrultuda denklem (2.21) yeniden düzenlenirse;

$$\Delta E_{sistem} = \Delta U_{sistem} = U_{son} - U_{ilk} = U_{\ddot{u}} - U_g \quad (2.22)$$

Sisteme enerji geçişi, ısı ve iş biçimlerinde olduğu ve net enerji miktarının giren ve çıkan enerji geçişi miktarlarının farkına eşit olacağı hatırlanırsa; enerjinin korunumu denklemini açık bir şekilde,

$$\Delta E_{sistem} = (Q_g - Q_{\ddot{u}}) + (W_g - W_{\ddot{u}}) \quad (2.23)$$

Denklem (2.22 ve 2.23) birleştirilirse ve sisteme ısı transferinin pozitif, sistemden ısı transferinin negatif ve sistemden iş transferinin pozitif, sisteme iş transferinin negatif olduğu düşünülerek denklem düzenlenirse,

$$U_{\ddot{u}} - U_g = (Q_g - Q_{\ddot{u}}) + (-W_g + W_{\ddot{u}}) = (Q_g - Q_{\ddot{u}}) - (W_g - W_{\ddot{u}}) \quad (2.24)$$

Denklem (2.24)'deki ısı ve iş ifadeleri indisler bazında sadeleştirilirse,

$$Q_{g-\ddot{u}} - W_{g-\ddot{u}} = U_{\ddot{u}} - U_g \quad (2.25)$$

Denklemlerdeki 'g' indisi reaksiyona giren maddeleri, 'ü' indisi de reaksiyon sonucu oluşan maddeleri, yani ürünleri göstermektedir.

Q = ısı transferini,

W = iş transferini,

U = iç enerji transferini göstermektedir.

Formüle göre hesaplama sonucunda bulunan değer pozitif (+) ise; sisteme ısı transferi ve/veya sistemden iş transferi anlamına gelir. Eğer hesaplama sonucunda bulunan değer negatif (-) ise; sistemden dışarıya ısı transferini ve/veya sisteme iş transferi anlamına gelir.

Adyabatik sistemlerde, yani ısı transferi bakımından dış ortamdan yalıtılmış sistemlerde $Q = 0$, hareketsiz, sabit sistemlerde ise $W = 0$ olur. Bir örnek üzerinde düşünülürse, bir piston silindir mekanizmasında silindirin etrafı yalıtım ile sarılmış olsun; pistondan dışarı ve dışardan pistona herhangi bir ısı transferi meydana gelmez. Dolayısıyla sistemin ısı transferi sıfır (0) olur. Başka bir durumda da silindir etrafında yalıtım olmadığı ve pistonun ileri-geri hareket etmediği düşünülürse; piston herhangi bir mekanik iş üretmez. Dolayısıyla bu durumda da iş transferi sıfır (0) olur.

Termodinamiğin Birinci Yasası uygulamalarda iki farklı şart altında değerlendirilir. Bu şartlardan biri, sabit hacim altında uygulanması, ikincisi ise sabit basınç altında uygulanmasıdır.

Birinci Yasa sabit hacimli bir sisteme uygulanırsa,

$$W_{g-\ddot{u}} = \int_g^{\ddot{u}} p \, dV \quad (2.26)$$

Denklem (2.26)'da sabit hacimden dolayı $dV = 0$ olur. Dolayısıyla iç enerji değişimi sadece ısı transferine bağlı olur. Aynı zamanda ilk ve son sıcaklıklarının da aynı olduğu bir sistemde,

$$Q_{g-\ddot{u}} = U'_{\ddot{u}} - U'_g = (\Delta U)_{V,T'} \quad (2.27)$$

Denklem (2.27)'deki ve bundan sonraki denklemlerde ilgili parametrenin üzerindeki ' işaretini sıcaklığın sabit olduğu durumları göstermektedir.

Birinci Yasa sabit basınç altında uygulanırsa, denklem (2.26), denklem (2.28)'e dönüşür.

$$W_{g-\ddot{u}} = \int_g^{\ddot{u}} p \, dV = p (V_{\ddot{u}} - V_g) \quad (2.28)$$

Denklem (2.28), denklem (2.25)'te yerine yazılırsa ve denklem düzenlenirse,

$$Q_{g-\ddot{u}} - p (V'_{\ddot{u}} - V'_g) = U'_{\ddot{u}} - U'_g \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} Q_{g-\ddot{u}} &= \frac{(U'_{\ddot{u}} + pV'_{\ddot{u}})}{H'_{\ddot{u}}} - \frac{(U'_g + pV'_g)}{H'_g} \\ &= H'_{\ddot{u}} - H'_g = (\Delta H)_{p,T'} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Denklem (2.30) sabit basınç ve sıcaklık altında sistemin entalpi değişimini ifade etmektedir. Entalpi değişimi aynı zamanda bir kimyasal reaksiyonun ısı değişimi gösterir. Eğer entalpi değişimi hesaplama sonucu, negatif (-) bulunursa, oluşan reaksiyon ekzotermik, yani dışarı ısı transferi olan bir reaksiyondur. Fakat entalpi değişimi hesaplama sonucu, pozitif (+) bulunursa, reaksiyon endotermik, yani dışardan sisteme ısı transferi olan bir reaksiyondur.

2.5.1. Reaksiyon entalpisi

Enerji denklik bağıntısının entalpi değişimine indirgenmiş hali (denklem (2.30)) genel bir sistemin entalpi değişimini vermektedir. Bu noktada reaksiyon sistemleri için entalpi değişimini detaylı bir şekilde incelemek gerekir. Daha öncede bahsedildiği gibi, entalpi bir belirli bir 1 noktasından 2 noktasına kadar olan bir hal değişiminin, sabit basınç ve sıcaklıktaki enerji değişimi olarak ifadesidir. Tepkimeli sistemlerde ise, entalpinin standart referans hale göre ve kimyasal enerji terimleri açıkça görülebilecek bir biçimde ifade edilmesi gerekir. Entalpi terimi, standart referans haldeki oluşum entalpisine, $\overline{h}_{ol}^{\circ}$, indirgenmelidir. O halde entalpi ifadesi tepkimeli sistemler için ifade edilirse,

$$(\Delta H)_{p,T'} = \overline{h}_{ol}^{\circ} + (\overline{h} - \overline{h}^{\circ}) \quad (2.31)$$

Denklem (2.31)'de parantez içindeki terim, belirli bir haldeki duyulur entalpi, \overline{h} , ile 25°C ve 1 atmosfer basınçtaki standart referans haldeki duyulur entalpi, \overline{h}° , arasındaki

fark olan standart hale göre duyulur entalpiyi göstermektedir. Bu tanım, oluşumlarına bakılmaksızın kullanılan referans hale bakılmaksızın, tablolardan alınan entalpi değerlerini kullanma imkanı tanır.

Entalpi, denklem (2.30)'a göre, reaksiyon sonucu oluşan ürünler ile reaksiyona giren maddelerin entalpilerinin farkına eşit olarak tanımlanmıştır. O halde, denklem (2.30) denklem (2.31) formunda yazılırsa,

$$(\Delta H)_{p,T'} = (\bar{h}_{ol}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_{\bar{u}} - (\bar{h}_{ol}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_{\bar{g}} \quad (2.32)$$

Reaksiyonlarda tepkimeye giren ve reaksiyon sonucu ürünler birden fazla olabilir. Bu durumda denklem (2.32) toplam giren maddeler ve toplam oluşan ürünler formatında ve mol sayılarını da dikkate alarak ifade etmek daha doğru bir yaklaşım olur.

$$(\Delta H)_{p,T'} = \sum_{i=1}^n N_{\bar{u}} (\bar{h}_{ol}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_{\bar{u}} - \sum_{i=1}^n N_{\bar{g}} (\bar{h}_{ol}^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_{\bar{g}} \quad (2.33)$$

Denklem (2.33) bir yanma işlemi sırasında oluşan ısının, basit bir şekilde yanma odasında oluşan yanma ürünleri ile yanma odasına giren maddelerin enerjileri arasındaki farkı ifade etmektedir.

2.5.1.a. Oluşum entalpisi

Reaksiyon ısısı hesaplamalarda kullanılan eşitliklerde bulunan bir terim olan oluşum entalpisini (\bar{h}_{ol}^o) açıklamak gerekir. Bu özellik belli bir haldeki maddenin kendi kimyasal bileşiminden ileri gelen entalpi olarak tanımlanır. Bu özelliğin sayısal değerleri tablolarda mevcuttur. Tablolardan ilgili bileşiğin oluşum entalpisine ulaşılabilir.

Oluşum entalpisi isminden de anlaşılacağı gibi bir oluşum sonucu oluşan enerjidir. Yani bileşiklerin oluşum entalpileri mevcuttur. Elementlerin (O_2, N_2, H_2, C gibi) oluşum

entalpileri sıfır (0) kabul edilir. Çünkü doğada zaten bulunan ve bir oluşma sonucu meydana gelmemiştir. Tüm kararlı elementlerin $\overline{h_{ol}^o} = 0$ 'dır. Tanımda bahsedilen kararlı terimini açıklamak gerekirse, 25°C ve 1 atmosfer basınçta ilgili maddenin kararlı halde olması demektir. Çizelge 2.1'de bazı bileşiklerin oluşum entalpileri verilmiştir.

Çizelge 2.1. 25°C ve 1 atmosfer basınçta bazı bileşiklerin oluşum entalpileri ($\overline{h_{ol}^o}$)

Bileşik	Hali	$\overline{h_{ol}^o}$ (kJ/kmol)	Bileşik	Hali	$\overline{h_{ol}^o}$ (kJ/kmol)
H ₂ O	Gaz	-241.826	H ₂ S	Gaz	-20.63
H ₂ O	Sıvı	-285.830	H ₂ SO ₄	Sıvı	-814.00
H ₂ O ₂	Gaz	-133.2	SO ₂	Gaz	-296.8
HF	Gaz	-271.1	SO ₃	Gaz	-395.7
HCl	Gaz	-92.312	CO	Gaz	-110.523
HBr	Gaz	-36.40	CO ₂	Gaz	-393.513
HI	Gaz	+26.48	CoCl ₂	Sıvı	-205.9
HIO ₃	Kristal	-283.6	S ₂ Cl ₂	Gaz	-23.85
NO	Gaz	+90.25	NH ₃	Gaz	-46.11
NO ₂	Gaz	+82.05	HN ₃	Gaz	+294.1

Çizelge 2.1'e dikkat edilirse bazı bileşiklerin farklı fazlarda bulunmaktadır. Dolayısıyla yanma reaksiyonlarında, yanma ürünleri arasında değişik fazlarda bulunabilen bileşiklerin oluşumu esnasında, oluşan enerji farklı olacaktır. Yanma ürünleri arasında bulunan suyun bulunduğu faz önemlidir. Hatta o kadar önemlidir ki reaksiyon sonucu oluşan ürünlerde suyun fazı oluşan enerjiyi belirleyicidir. Hatta suyun bulunduğu faza göre oluşan ısıya değişik tanımlamalar yapılmıştır.

2.5.1.b. Isıl değer

Yanma reaksiyonları sonucu oluşan suyun fazı oluşan ısının niteliğini belirlediği daha önce belirtilmişti. Bu ısının niteliği daha detaylı tanımlanırsa, yanma ürünleri arasında bulunan su, eğer sıvı fazda ise; meydana gelen ısı üst ısıl değerdir. Fakat su buhar fazda ise ısıl değer, alt ısıl değer adını almaktadır. Üst ısıl değer ile alt ısıl değer arasındaki fark, yanma ürünleri arasında bulunan suyun buharlaşma enerjisi kadardır. Dolayısıyla yanma ürünleri arasında, su buhar fazda ise yanma reaksiyonu sonucu oluşan enerjinin değeri daha düşüktür, su sıvı fazda ise oluşan enerjinin değeri daha yüksektir. Eğer bu ısıl değer formüle edilirse,

$$\dot{U}ID = AID + (mh_b)_{H_2O} \quad \left(\frac{kJ}{kg} \text{ yakıt} \right) \quad (2.34)$$

Denklem (2.34)'te,

$\dot{U}ID$ = Üst ısıl değeri,

AID = Alt ısıl değeri,

m = suyun kütlelerini,

h_b = suyun buharlaşma entalpisini,

göstermektedir.

2.6. İdeal Gaz Hal Denklemleri

İdeal bir karışımın kütlesi, karışımı oluşturan tüm bileşenlerin kütleleri toplamıdır.

$$m = \sum_{i=1}^n m_i \quad (kg) \quad (2.35)$$

Verilen bir bileşenin kütle fraksiyonu x_i olarak tanımlanır.

$$x_i = m_i/m \quad (2.36)$$

Aynı zamanda tüm komponentlerin kütle kesirleri toplamı da 1'e eşittir.

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (2.37)$$

Bir karışımın toplam iç enerjisi (U), karışımı oluşturan tüm komponentlerin birim kütle başına iç enerjileri (u_i) ile ilgili komponentin kütlesi (m_i) çarpımlarının toplamına eşittir.

$$U = \sum_{i=1}^n m_i u_i \text{ (kj)} \quad (2.38)$$

Yoğun kütle iç enerjisi, ilgili bileşenin kütle kesri (x_i) ile komponentin iç enerjisi çarpımına eşittir.

$$u = \sum_{i=1}^n x_i u_i \left(\frac{\text{kj}}{\text{kg}} \right) \quad (2.39)$$

İç enerjideki benzer ilişkiler entalpi için de geçerlidir.

$$H = \sum_{i=1}^n m_i h_i \text{ (kj)} \quad (2.40)$$

$$h = \sum_{i=1}^n x_i h_i \left(\frac{\text{kj}}{\text{kg}} \right) \quad (2.41)$$

Bir karışımın toplam mol sayısı (N), karışımı oluşturan tüm komponentlerin mol sayıları (n_i) toplamına eşittir.

$$N = \sum_{i=1}^n n_i \quad (2.42)$$

Bir karışımı oluşturan komponentlerin mol kesirleri (y_i), ilgili bileşenin mol sayısının (n_i), toplam mol sayısına (N) oranına eşittir.

$$y_i = \frac{n_i}{N} \quad (2.43)$$

Karışımın iç enerji toplamı (U), kütle kesrine benzer şekilde mol sayısı (n_i) cinsinden de yazılabilir.

$$U = \sum_{i=1}^n n_i \bar{u}_i \text{ (kj)} \quad (2.44)$$

Molar yoğun iç enerji de (\bar{u}), kütle kesrine benzer şekilde mol kesri (y_i) cinsinden de yazılabilir.

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^n y_i \bar{u}_i \text{ (} \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{)} \quad (2.45)$$

Entalpi (H) ve molar yoğun entalpi (\bar{h}_i) de iç enerji gibi mol sayısı ve mol kesri cinsinden ifade edilebilir.

$$H = \sum_{i=1}^n n_i \bar{h}_i \text{ (kj)} \quad (2.46)$$

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^n y_i \bar{h}_i \text{ (} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{)} \quad (2.47)$$

İdeal gaz konusundaki denklemlerdeki, simgelere dikkat edilmelidir. Konuda kavram fazla olduğu için, bu tür ince nüanslara dikkat edilmelidir.

Bir karışımın moleküler ağırlığı (M), karışımı oluşturan tüm bileşenlerin mol kesirleri (y_i) ile moleküler ağırlıkları çarpımının toplamına eşittir.

$$M = \sum_{i=1}^n y_i M_i \text{ (kg/kmol)} \quad (2.48)$$

Moleküler ağırlık, molar yoğun ve kütleli yoğun birimleri arasındaki bir dönüşüm faktörü olarak önemlidir. Örnek olarak yoğun kütle gaz sabiti (R) ile yoğun molar gaz sabiti arasındaki dönüşüm aşağıdaki gibidir.

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (2.49)$$

Benzer ilişkiler basınç (P), sıcaklık (T) ve hacim (V) arasında da vardır.

$$\left. \begin{aligned} PV &= NR_u T \\ PV &= mRT \\ Pv &= RT \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

Bir karışımın entropisi (S), karışımı oluşturan tüm komponentlerin kütle kesirleri (m_i) ile birim kütle entropilerinin (s_i) çarpımlarının toplamlarına veya mol kesirleri (n_i) ile yoğun molar entropilerinin (\bar{s}_i) çarpımlarının toplamına eşittir.

$$S = \sum_{i=1}^n m_i s_i = \sum_{i=1}^n n_i \bar{s}_i \quad \left(\frac{kJ}{K} \right) \quad (2.51)$$

Başka bir önemli nokta da, bir bileşenin entalpisi, toplam basınç üzerinden değerlendirilirken, bir bileşenin entropisi, ilgili bileşenin kısmi basıncı üzerinden değerlendirilir. Bir bileşenin kısmi basınca,

$$P_i = y_i P \quad (kPa) \quad (2.52)$$

Denklem (2.52) ile hesaplanırken, bir komponentin entropisi denklem (2.53) ile hesaplanır.

$$s_i = s_i^o - R_i \ln(P_i/P_o) \quad \left(\frac{kJ}{kg K} \right) \quad (2.53)$$

Denklem (2.51) ile denklem (2.53) birleştirilirse,

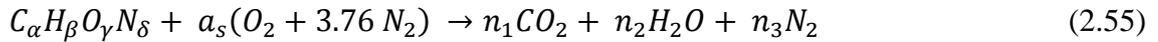
$$s = -R \ln(P/P_o) + \sum_{i=1}^n x_i (s_i^o - R_i \ln y_i) \quad \left(\frac{kJ}{kg K} \right) \quad (2.54)$$

$$\bar{s} = -R_u \ln (P/P_o) + \sum_{i=1}^n y_i (\bar{s}_i^o - R_u \ln y_i) \left(\frac{kJ}{kmol K} \right) \quad (2.55)$$

Birçok yanma ürünleri ve kirleticiler için termodinamik veriler 1971 yılında Ulusal Standartlar Bürosu tarafından yayınlanan bir derleme mevcuttur. Tek bileşenli yakıtlar için 1969'da Stull, Westrum ve Sinke tarafından sunulan veriler JANAF tablolarındaki veriler gibidir. Bu iki referansa ek olarak, 1953 yılında Rossini tarafından derlenen ve 1500 K gibi yüksek sıcaklıklardaki hidrokarbon yakıtlar için olan derlemedir. (Ferguson and Kirkpatrick 2001)

2.7. Stokiyometri ve Düşük Sıcaklıkta Yanmanın Modellenmesi

Bir yanma reaksiyonunda yakıt, yakıcı olarak hava ve yanma ürünleri olarak da karbon dioksit (CO₂) ve su (H₂O) olduğu düşünülerek genel yanma denklemi yazılırsa,



Reaksiyonda yakıt için 1 mol temel alınmıştır. Denklem her bir atomun denklğine göre çözülürse,

$$\left. \begin{array}{l} \text{C: } \alpha = n_1 \\ \text{H: } \beta = 2n_2 \\ \text{O: } \gamma + 2a_s = 2n_1 + n_2 \\ \text{N: } \delta + 2 \times 3.76 \times a_s = 2n_3 \end{array} \right\} \quad (2.56)$$

Verilen bu dört denklem çözülürse,

$$\left. \begin{aligned}
 a_s &= \alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \\
 n_1 &= \alpha \\
 n_2 &= \frac{\beta}{2} \\
 n_3 &= \frac{\delta}{2} + 3.76 \left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2} \right)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

Stokiyometrik hava/yakıt oranı A_s ise,

$$A_s = \frac{28.85 (4.76 a_s)}{(12.01 \alpha + 1.008 \beta + 16.00 \gamma + 14.01 \delta)} \quad (2.58)$$

Çizelge 2.2. Moleküler ağırlık, stokiyometrik oran ve yanma ürünleri fraksiyonu

Yakıt	Kimyasal Formül	M	A_s	F_s	a_s	y_{CO_2}	y_{H_2O}	y_{N_2}
Metan	CH ₄	16.04	17.12	0.0584	2.00	0.095	0.190	0.715
Propan	C ₃ H ₈	44.09	15.57	0.0642	5.00	0.116	0.155	0.729
Benzin	C ₇ H ₁₇	101.2	15.27	0.0655	11.2	0.121	0.147	0.732
Oktan	C ₈ H ₁₈	114.2	15.03	0.0665	12.5	0.125	0.141	0.734
Dizel	C _{14.4} H _{24.9}	198.0	14.30	0.0699	20.6	0.138	0.119	0.743
Metanol	CH ₄	32.04	6.43	0.1556	1.5	0.116	0.231	0.653
Etanol	C ₂ H ₆ O	46.07	8.94	0.1118	3.00	0.123	0.184	0.693
Nitrometan	CH ₃ NO ₂	61.04	1.69	0.5927	0.75	0.158	0.237	0.604
Hidrojen	H ₂	2.02	34.06	0.0294	0.50	0.000	0.347	0.653
Asetilen	C ₂ H ₂	26.04	13.19	0.0758	2.50	0.161	0.081	0.758
Amonyak	NH ₃	17.03	6.05	0.1654	0.75	0.000	0.282	0.718

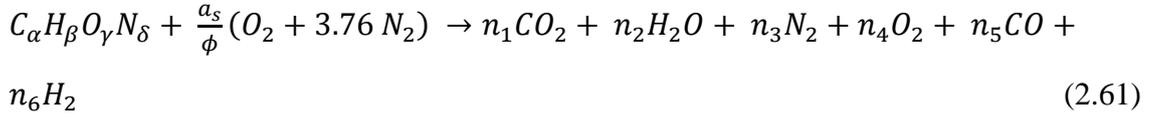
Bir hava-yakıt karışımı içerisindeki yakıtın molar ve kütleli fraksiyonları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$y_s = \frac{1}{1 + 4.76 a_s} \quad , \quad x_s = \frac{1}{1 + A_s} \quad (2.59)$$

Eküvalans oranı (ϕ), daha önce de tanımlandığı gibi (denklem (2.18)) gerçek yakıt/hava oranının (A_s), stokiometrik yakıt/hava oranına (A) bölümüyle veya stokiometrik hava/yakıt oranının (F), gerçek hava/yakıt oranına (F_s) bölümüyle elde edilir.

$$\phi = \frac{A_s}{A} = \frac{F}{F_s} \quad (2.60)$$

Düşük sıcaklıklarda (örneğin; $T < 1000 \text{ K}$, gibi egzoz sıcaklıklarında), 1'den küçük hava fazlalık katsayısında ($\lambda < 1$), bir yanma denklemi ve katsayıları aşağıdaki gibi ifade edilebilir:



Aynı şekilde düşük sıcaklıklarda (örneğin; $T < 1000 \text{ K}$, gibi egzoz sıcaklıklarında), 1'den büyük hava fazlalık katsayısında ($\lambda > 1$), katı karbon partiküller oluşur ve bunların da hesaba katılması gerekir.

Düşük sıcaklıkta fakir yanma ürünlerinde ($\phi < 1$), CO ve H₂ bulunmadığı kabul edilir. Bunlarla ilgili mol fraksiyonları sıfır (0) kabul edilir. Bu durumda, ürünlerin kompozisyonlarının hesaplanmasında dört denklem ve dört bilinmeyen kalır, denklem sayısı ve bilinmeyen sayısı eşit olduğu için bu denklem takımının çözümü vardır. Çözüm sonucu yanma ürünlerinin kompozisyonu hesaplanabilir.

Düşük sıcaklıklarda zengin yanma ürünlerinde ($\phi > 1$), O₂ bulunmadığı kabul edilir. Oksijen ile ilgili mol fraksiyonu sıfır (0) kabul edilir. Bu durumda, ürünlerin kompozisyonlarının hesaplanmasında, beş bilinmeyen, dört denklem vardır. Böyle bir denklem sisteminin çözümü yoktur ve 1 adet denkleme daha ihtiyaç vardır. Bu durumda yanma ürünlerinin (CO₂, H₂O, CO ve H₂) dengede olduğu varsayılarak bir reaksiyon tanımlanır. Bu reaksiyon, su-gaz reaksiyonu olarak adlandırılır.



Denklem (2.62)'deki reaksiyonun denge sabiti eşitliği, beş bilinmeyenli, dört denklem sistemi için beşinci denklemi oluşturur ve denklem sisteminin çözümünü sağlar.

$$K(T) = \frac{n_2 n_5}{n_1 n_6} \quad (2.63)$$

Denge sabiti $K(T)$ eşitliği, bir eğri uydurma mantığı ile hazırlanmış olan $400 < T < 3200$ K aralığındaki JANAF Tablosu verilerinden,

$$\ln K(T) = 2.743 - \frac{1.761}{t} - \frac{1.611}{t^2} + \frac{0.2803}{t^3} \quad , \quad \left(t = \frac{T}{1000} \right) \quad (2.64)$$

Zengin yanma ve fakir yanma için Çizelge 2.3 yardımıyla ortak çözüm yapılır. Zengin karışımlarda karbon monoksitin (CO), mol sayısı (n_5) aşağıdaki eşitlik ile bulunur.

$$n_5 = \frac{-b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4a_1 c_1}}{2a_1} \quad (2.65)$$

Çizelge 2.3. Düşük sıcaklıkta yanma ürünleri

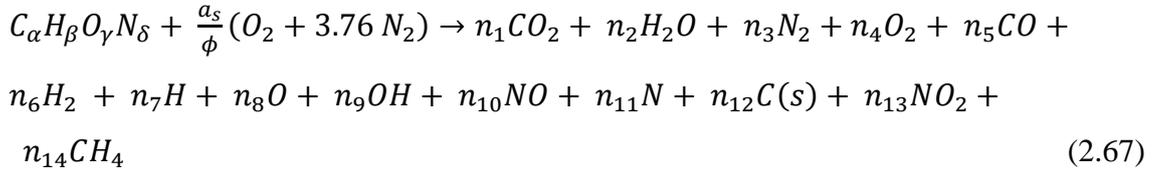
Türler	n_i	$\phi \leq 1$	$\phi > 1$
CO ₂	n_1	α	$\alpha - n_5$
H ₂ O	n_2	$\beta/2$	$\beta/2 - d_1 + n_5$
N ₂	n_3	$\delta/2 + 3.76 a_s/\phi$	$\delta/2 + 3.76 a_s/\phi$
O ₂	n_4	$a_s (1/\phi - 1)$	0
CO	n_5	0	n_5
H ₂	n_6	0	$d_1 - n_5$

Çizelge 2.3'teki denklemlerde bulunan a_1, b_1, c_1, d_1 katsayıları aşağıdaki denklemler vasıtasıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 1 - K \\
 b_1 &= \frac{\beta}{2} + K\alpha - d_1(1 - K) \\
 c_1 &= -\alpha d_1 K \\
 d_1 &= 2 a_s \left(1 - \frac{1}{\phi}\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.66}$$

2.8. Genel Kimyasal Denge

Yanma sonucu genel olarak çok çeşitli yanma sonu ürünleri vardır. Yanma öncesi, yakıt hava ile belirli bir eküvalans oranında (ϕ) karıştırılır. Yanma sonucu oluşan ürünler yanma sonu sıcaklığı ile yanma sonu basıncında dengede kabul edilir. Bu denge şartından faydalanılarak yanma sonu ürünlerinin yapısı ve termodinamik özellikleri belirlenir. Bir yakıtın birim molünün yanma denklemi aşağıdaki gibidir.



Kimyasal denge ile ilgili problemlerin çözümünde kullanılan iki yöntem mevcuttur. Bunlardan birisi Gibbs Serbest Enerjisinin Minimizasyonu, ikinci ise Olikara ve Borman tarafından 1975 yılında önerilmiş olan Denge Katsayıları Yöntemidir.

2.8.1. Gibbs serbest enerjisinin minimizasyonu

Kimyasal denge problemlerinin çözümünde kullanılan ve basit bir yöntem olan Gibbs Serbest Enerjisinin Minimizasyonu veya Entropinin Maksimizasyonu yöntemidir.

Bu yöntemde dengenin temel değişkenleri olan sıcaklık ve basınçtan faydalanılarak çözüme gidilir. Bir karışımı oluşturan n türleri cinsinden karışımın Gibbs Serbest Enerjisi,

$$g = \sum_{j=1}^n \mu_j n_j \quad (kJ) \quad (2.68)$$

Denklem (2.69)'da j , karışımının içerisindeki herhangi bir türün indisi, μ_j , ilgili bileşenin kimyasal potansiyelidir.

$$\mu_j = \left(\frac{\partial g}{\partial n_j} \right)_{T,P,n_{i \neq j}} \quad (kJ/kmol) \quad (2.69)$$

Denge durumu, atom denkliğinin kısıtlamalarından dolayı Gibbs Serbest Enerjisinin Minimizasyonu ile çözümlenir.

$$b'_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} n_j \quad i = 1, \dots, l \quad (2.70a)$$

Veya

$$b_i - b'_i = 0 \quad i = 1, \dots, l \quad (2.70b)$$

Denklem (2.70a) ve (2.70b)'de l atom türlerinin sayısını; a_{ij} ilgili elemanı temsil eder; i ilgili atomun türünün, j ise atom sayısının indisidir; b'_i reaksiyona giren bir elemanın ilgili atomunu temsil eder.

$$b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} n_j \quad (2.71)$$

Denklem (2.71)'deki b_i ise ürünlerdeki bir i elemanın atom sayısını temsil eder.

Gibbs, tanımsal olarak,

$$G = g + \sum_{i=1}^l \lambda_i (b_i - b'_i) \quad (2.72)$$

Denklem (2.72)'de λ_i Lagrange Çarpanlarını temsil eder de denge denklemi bu çarpanlar ile ifade edilirse,

$$\partial G = \sum_{j=1}^n (\mu_j + \sum_{i=1}^l \lambda_i a_{ij}) \partial n_j + \sum_{i=1}^l (b_i - b'_i) \partial \lambda_i = 0 \quad (2.73)$$

Denklem (2.73)'ün sol terimi sıfıra eşitlenirse,

$$\mu_j + \sum_{i=1}^l \lambda_i a_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.74)$$

İdeal gazlar için Gibbs Serbest Enerji tanımının denklem olarak ifadesi,

$$\mu_j = \mu_j^0 + R_u T \ln(n_j/N) + R_u T \ln(P/P_0) \quad (2.75)$$

Denklem (2.75) ile denklem (2.74) birleştirilip ve elde edilen eşitliğin her iki tarafı $R_u T$ 'ye bölünürse denklem (2.76) elde edilir.

$$\frac{\mu_j^0}{R_u T} + \ln(n_j/N) + \ln(P/P_0) + \sum_{i=1}^l \pi_i a_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.76)$$

Burada,

$$\pi_i = \lambda_i / R_u T \quad (2.77)$$

Lagrange Çarpanı Yaklaşımı ile denge kompozisyonunun belirlenmesi için $n + l + 1$ dizisinin çözülmesi gerekir. Bu dizi çözümlendikten sonra diğer adımlara gidilir.

$$N = \sum_{j=1}^n n_j \quad (2.78)$$

Dizi çözümlenmesi sonucu ürün bileşimleri belirlendikten sonra, artık denge karışımının termodinamik özellikleri belirlenebilir. Herhangi iki bağımsız özelliğin; T, P, H, S, U ve V gibi özelliklerin arasından bilinmesi gerekir. Örneğin, sabit basınçta bir yanma prosesinde entalpinin belirlenmesi için sıcaklığı da bilinmesi gerekir. Bir karışımın entalpisi aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$H = \sum_{j=1}^n n_j \bar{h}_j \quad (2.79)$$

Başka bir örnek olarak bir izentropik (sabit entropili proses) sıkıştırma veya genişlemede entropi yerine sıcaklık veya entalpi verilebilir. Sistemin entropisi,

$$S = \sum_{j=1}^n n_j (\bar{S}_j^o - R_u \ln(n_j/N) - R_u \ln(P/P_o)) \quad (2.80)$$

Son olarak, basıncın sabit olduğu durumda, volümetrik hacmin hesaplanabilmesi için Gibbs Serbest Enerjisini minimize etmek gerekir (Gordon ve McBride, 1971). Bunun için ideal gaz hal denklemindeki basınç ifadesi, denklem (2.76)'deki basınç ifadesinin yerine yazılması gerekir.

$$\frac{\mu_j^o}{R_u T} + \ln(n_j/N) + \ln\left(\frac{RT}{P_o v}\right) + \sum_{i=1}^l \pi_i a_{ij} = 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (2.81)$$

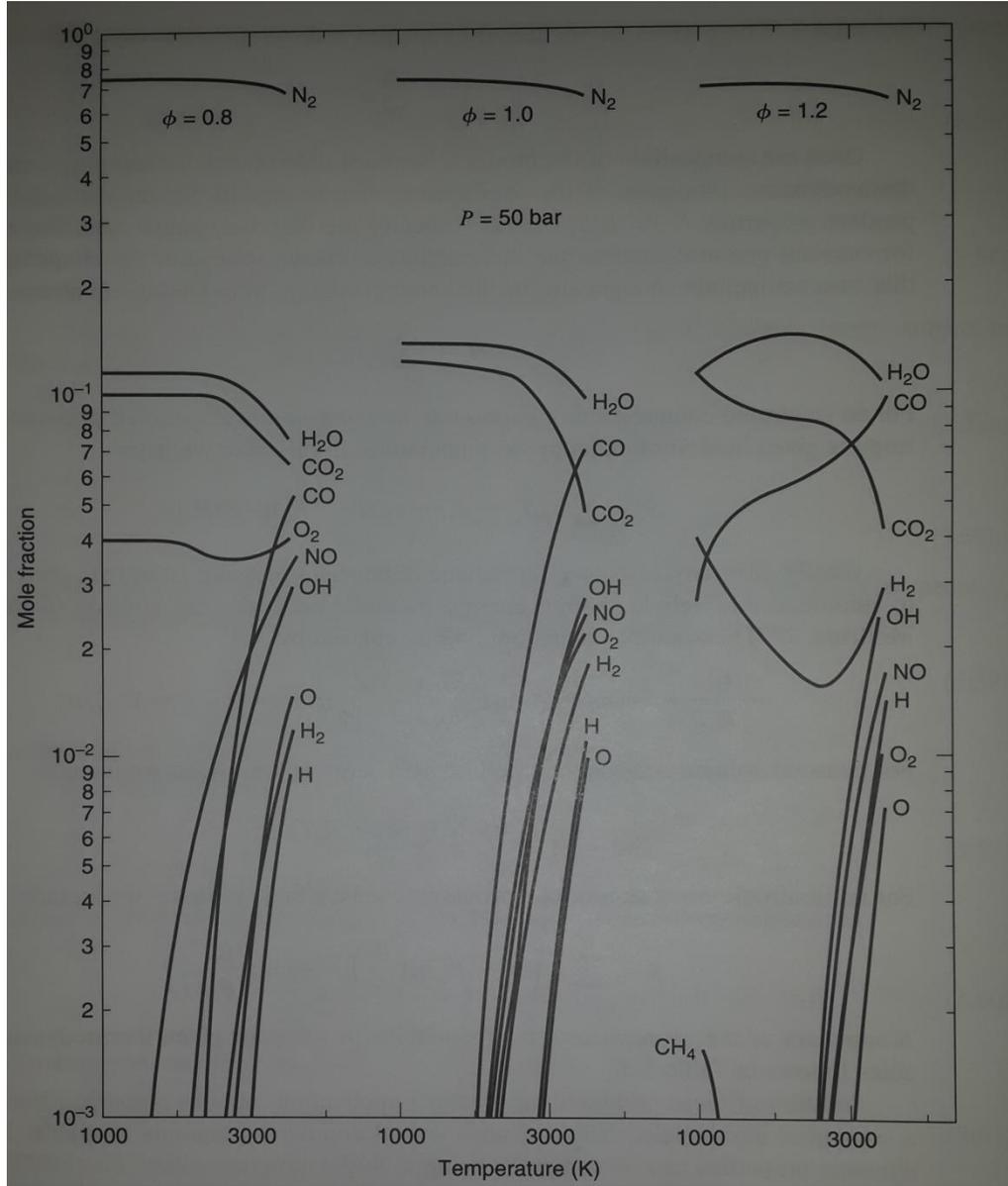
Sabit hacimdeki iç enerji hesabı,

$$U = \sum_{j=1}^n n_j (\bar{h}_j - R_u T) \quad (2.82)$$

Denklem (2.82) ile yapılırken, izentropik genişleme ve sıkıştırma için volümetrik hacim hesabı aşağıdaki denklem ile yapılır.

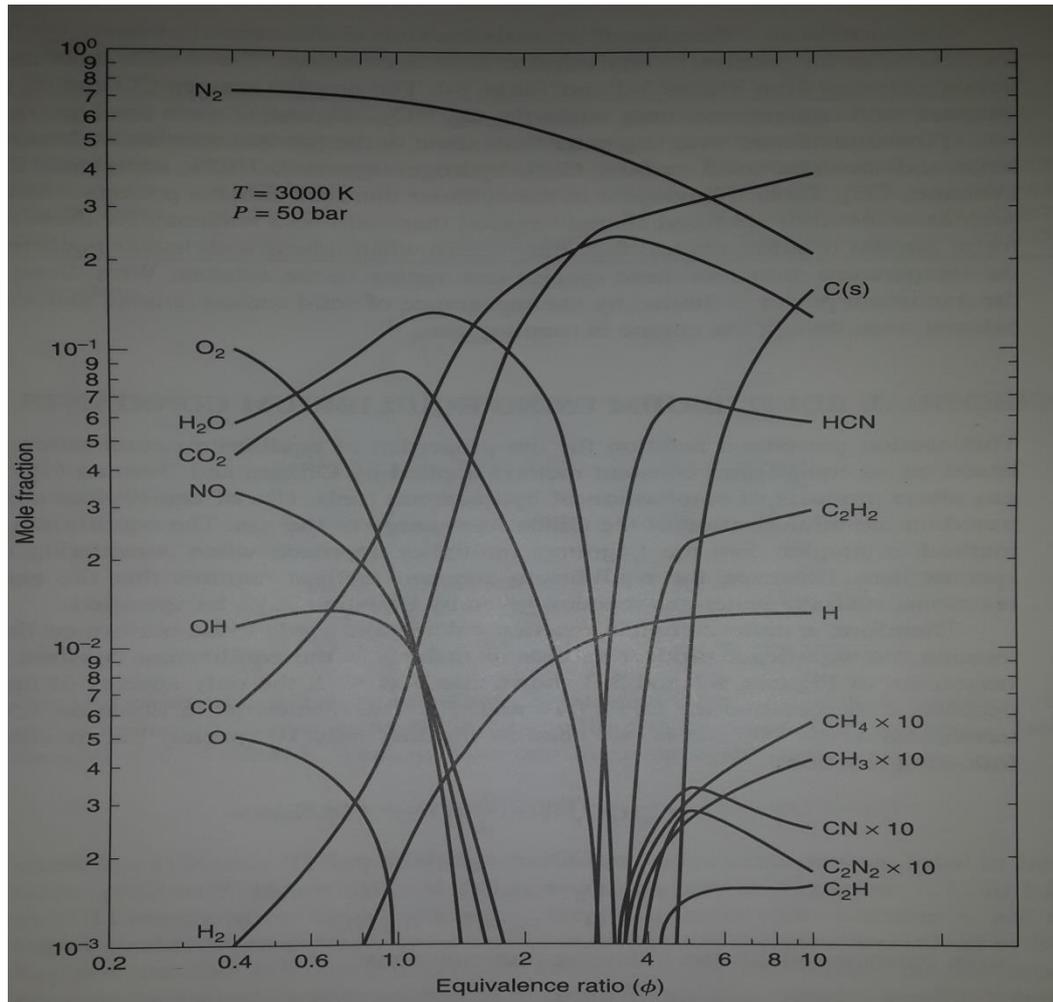
$$S = \sum_{j=1}^n n_j \left(\bar{S}_j^o - R_u \ln(n_j/N) - R_u \ln\left(\frac{RT}{P_o v}\right) \right) \quad (2.83)$$

Bu problemlerin pratik olarak çözümü için, bir bilgisayar programında iterasyon mantığıyla çözdürülmesi gerekir. Böyle problemlerin çözümünde kullanılan birkaç adet program mevcuttur. Bunlardan biri, karışımların termodinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan TRANS72 (Svehla and McBride, 1973) adında bir NASA programıdır. Bir diğeri ise, denge mol fraksiyonlarının belirlenmesinde kullanılan STANJAN (Ferguson and Kirkpatrick 2001) programıdır.



Şekil 2.1. Değişik sıcaklıklarda oktan (C_8H_{18}) ve havanın yanma kompozisyonu

Farklı sıcaklık ve farklı eküvalans oranında C_8H_{18} 'in 50 bar basınçta yakılması sonucu elde edilen yanma ürünlerinin kompozisyonu sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir. En büyük mol fraksiyonları N_2 , H_2O ve CO_2 'nin mol fraksiyonlarıdır. 50 bar basınçtaki değerler, 2000 K'den düşük sıcaklıklar için iyi bir yaklaşım olan Çizelge 2.3'den faydalanılarak oluşturulmuştur. Çünkü düşük basınçlarda ayrışma, atmosfer basıncına yakın, ancak 1500 K üzerindeki sıcaklıklarda etkilidir. Reaksiyon sıcaklığı 1500 K'nin üzerine çıktığında CO , NO , OH , O_2 , O , H_2 ve H gibi ürün türleri önemli mertebede artış göstermiştir. Fakir yanma koşullarında O_2 türü reaksiyon sıcaklığına nispeten duyarsızdır. Zengin karışımlarda ise H_2 'nin mol fraksiyonu ilk başta azalmakta ve artan sıcaklıkla birlikte artmaktadır.



Şekil 2.2. 3000 K'de oktan (C_8H_{18}) ve havanın yanma denge kompozisyonu

Yüksek sıcaklıklarda Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'ye dikkat edilirse önemli derecede azot oksit (NO) mevcuttur. Motor silindiri içerisinde bulunan herhangi bir gaz yükselen sıcaklıkla kimyasal dengeye gelme eğilimi gösterir. Motor içerisindeki bazı türler, termodinamik özelliklere katkıda bulunması için dengede olmasa da, silindir içerisinde kimyasal olaylar anlık meydana geldiği için dengede kabul edilirler. Azot oksit konsantrasyonu diğer kirleticilere oranla daha önemlidir. Azot oksit, düşük sıcaklıklarda da bulunabilmektedir. Emisyon ilerleyen bölümlerde incelenecektir.

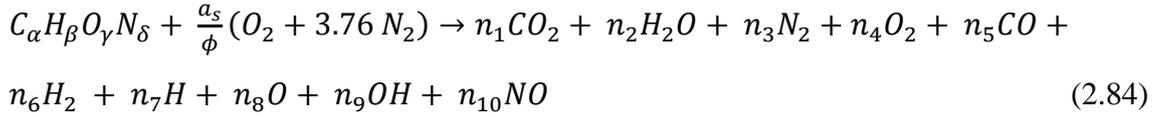
Eküvalans oranının (ϕ) bir fonksiyonu olarak denge kimyasal kompozisyonu Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Çizelge 2.3 ve Şekil 2.2'deki sonuçlar beklenen eğilimdedir. Yanma ürünleri arasından CO ve H₂'nin mol fraksiyonları artan eküvalans oranı ile artarken, O₂, NO, OH ve O türlerinin mol fraksiyonları artan eküvalans oranı ile azalmıştır.

Eğer eküvalans oranı 4'ten daha büyük olursa, kompozisyona katı karbon (C(k)), hidrojen siyanür (HCN), asetilen (C₂H₂) ve metan (CH₄) de katılır. Bu nedenle, dizel ya da kademeli dolgulu motorlarda olduğu gibi, silindirin herhangi bir yerinde eküvalans oranı (ϕ) 3'ten büyük olduğu durumlarda yakıt cepleri oluşur. Bu ceplerde, zamanla sıcaklığın düşmesiyle azot oksit donabilir. Donan azot oksit egzoz gazına görülebilir. Dizel motorlarda yüksek performansı, egzoz gazında duman ve kurumun varlığıyla sınırlıdır.

2.8.2. Denge katsayıları ile kimyasal denge

Bu bölüm, hidrokarbon yakıtların yakılması sonucu gaz fazı ürünlere uygulanan bir Denge Sabiti Yöntemi ile yanma ürünlerinin denge özelliklerinin belirlenmesinde çözüm sunmaktadır. Denge Sabiti Yönteminin temeli Gibbs Serbest Enerjisinin Minimasyonu olsa da, Lagrange Çarpanı metodundan daha basittir. Ancak Denge Sabiti Metodunda denklem takımının çözülebilmesi için denklem (2.62)'de verilen su-gaz fazı reaksiyonun da kullanılması gerekmektedir.

Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de eküvalans oranı (ϕ) 3’ten küçük olduğu durumlarda, önemli miktarlarda meydana gelen denge kompozisyonundaki ürünlere (10 tür) göre yanma denklemi yeniden düzenlenirse;



Atom balansı ile aşağıdaki dört denklem elde edilir.

$$C: \alpha = (y_1 + y_5)N \quad (2.85)$$

$$H: \beta = (2y_2 + 2y_6 + y_7 + y_9)N \quad (2.86)$$

$$O: \gamma + \frac{2a_s}{\phi} = (2y_1 + y_2 + 2y_4 + y_5 + y_8 + y_9 + y_{10})N \quad (2.87)$$

$$N: \delta + \frac{7.52a_s}{\phi} = (2y_3 + y_{10})N \quad (2.88)$$

Atom denkliği için yazılan denklemlerdeki N , toplam mol sayısı göstermektedir. Toplam mol sayısı aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$\sum_{i=1}^{10} y_i - 1 = 0 \quad (2.89)$$

Bundan sonraki adımda 6 tane faz-denge denklemi tanımlamıştır. Bu reaksiyonlar; hidrojen, oksijen, su, karbon dioksit, hidroksit ve azot oksit reaksiyonlarıdır.

Genel kimyasal denge denklemi,

$$aA + bB = cC + dD \quad (2.90)$$

Denklem (2.90)'nın kısmi basınçlar cinsinden denge katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$K_p = \frac{(P_C)^c (P_D)^d}{(P_A)^a (P_B)^b} \quad (2.91)$$

Kısmi basınç ile mol fraksiyonları arasındaki ilişki ideal gaz denklemine göre,

$$P_i = y_i P \quad (2.92)$$

Denklem (2.91), denklem (2.92) cinsinden yeniden düzenlenirse,

$$K_p = \frac{(y_C)^c (y_D)^d}{(y_A)^a (y_B)^b} P^{c+d-a-b} \quad (2.93)$$

Denklem (2.93)'ü baz alınarak yanma reaksiyonun denge denklemlerinin denge katsayıları kısmi basınçlar cinsinden yazılır.

$$\frac{1}{2} H_2 = H \quad K_1 = \frac{y_7 P^{1/2}}{y_6^{1/2}} \quad (2.94)$$

$$\frac{1}{2} O_2 = O \quad K_2 = \frac{y_8 P^{1/2}}{y_4^{1/2}} \quad (2.95)$$

$$\frac{1}{2} H_2 + \frac{1}{2} O_2 = OH \quad K_3 = \frac{y_9}{y_4^{1/2} y_6^{1/2}} \quad (2.96)$$

$$\frac{1}{2} O_2 + \frac{1}{2} N_2 = NO \quad K_4 = \frac{y_{10}}{y_4^{1/2} y_3^{1/2}} \quad (2.97)$$

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O \quad K_5 = \frac{y_2}{y_4^{1/2} y_6 P^{1/2}} \quad (2.98)$$

$$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2 \quad K_6 = \frac{y_1}{y_5 y_4^{1/2} P^{1/2}} \quad (2.99)$$

Denklem (2.90)'dan denklem (2.95)'e kadar olan denklemlerdeki basıncın birimi atmosferdir. Olikara and Borman (1975) tarafından $600 < T < 4000 K$ sıcaklık aralığı için hazırlanmış olan JANAF tablolarından $K_i(T)$ ifade etmişlerdir (Ferguson, Kirkpatrick 2001).

$$\log_{10} K_i(T) = A_i \ln(T/1000) + \frac{B_i}{T} + C_i + D_i T + E_i T^2 \quad (2.100)$$

Çizelge 2.4. Denklem (2.96) için denge sabitleri

<i>i</i>	A_i	B_i	C_i	D_i	E_i
1	+0.432168E+00	-0.112464E+05	+0.267269E+01	-0.745744E-04	+0.242484E-08
2	+0.310809E+00	-0.129540E+05	0.321779E+01	-0.738336E-04	+0.344645E-08
3	-0.141784E+00	-0.213308E+04	0.853461E+00	+0.355015E-04	-0.310227E-08
4	+0.150879E-01	-0.470959E+04	+0.646096E+00	+0.272805E-03	-0.154444E-08
5	-0.752364E+00	+0.124210E+05	-0.260286E+01	+0.259556E-03	-0.162687E-08
6	-0.415302E-02	+0.148627E+05	-0.475746E+01	+0.124699E-03	-0.900227E-08

Denklem (2.97)'de T sıcaklığı temsil eder ve birimi Kelvin'dir. Bu denklem için denge katsayıları Çizelge 2.4'te verilmiştir. Basınç, sıcaklık ve eküvalans oranı ve denge denklemleri değerlendirildiğinde 11 bilinmeyenli 11 adet denklem elde edilir. Bu 11 bilinmeyenli non-lineer denklem takımı Newton-Raphson iterasyon metoduyla çözülebilir. Bu çözümle edilen mol fraksiyonları ile hesaplamaya devam edilerek, entalpi, entropi, spesifik volüme ve iç enerji gibi diğer termodinamik özellikler hesaplanabilir.

2.9. Emisyon ve Hava Kirliliği

Yanma reaksiyonları sonucu oluşan emisyonlar, (çevre kirleticiler) yanma odasının geometrisi, yanma koşulları, yakıtın fiziksel hali ve kimyasal yapısı, yakma havası, sıcaklık ve basınç gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu kirleticiler, CO₂, CO, NO_x, H₂, N₂, SO_x, HC ve partikül maddelerdir.

Bu emisyonların oluşumu en fazla otomobiller tarafından olduğu ve otomobillerde de yakıt olarak hidrokarbon yakıtlar kullanıldığı için, içten yanmalı motorların emisyonları üzerinde durulmuştur.

Motor emisyonları arasında en çok önemlilik arz eden ve üzerinde durulması gerekenler, egzoz gazlarında bulunan hidrokarbonlar, azot ayrışma ve azot tepkimelerinin ürünleri (azot oksitler), kükürt tepkimelerinin ürünleri ve partikül maddelerdir. Otomobillerde bu emisyonların oluşumunu önlemek için egzoz gazlarına uygulanan son işlemler önemlidir. Bu işlemler esas, katalitik konvertör uygulamaları ve partikül filtreleri uygulamalarıdır.

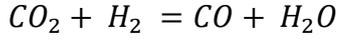
2.9.1. Karbon monoksit (CO)

Yanma ürünlerinin arasında karbon monoksit bulunmasının ana nedeni oksijen yetersizliğidir. Yanma odasının tümü ele alındığında oksijen genel olarak yetersiz olabileceği gibi, karışımın tamamen homojen olmaması durumunda, yanma odasının belirli bir konumunda yerel olarak oksijen eksikliği meydana gelebilir. Fakat temelde CO oluşumu eküvalans oranının kuvvetli bir fonksiyonu olarak değişmektedir.

Çizelge 2.5. Taşıtlar tarafından üretilen kirletici bileşenler

	HC (ppm)	CO (%)	NO _x (ppm)	H ₂ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ O (%)
Boşta Çalışma	750	5.2	30	1.7	9.5	13.0
Ekonomi	300	0.8	1500	0.2	12.5	13.1
İvmelenme	400	5.2	3000	1.2	10.2	13.1
Hız Kesme	4000	4.2	60	1.7	9.5	13.0

Yanma sırasında CO oluşumu su gazı dengesi olarak adlandırılan,



Denklem (2.62) ile belirlenmektedir. Yüksek alev sıcaklıklarında bu denge reaksiyonundan CO₂ miktarına oranla daha fazla CO elde edilir. Ancak sıcaklık düştükçe CO'nun CO₂'ye oksidasyonu söz konusudur. Bu yüzden fakir veya stokiometrik karışımlarda egzoz gazları içerisinde CO miktarı daha az olurken, zengin karışımlarda soğuk egzoz gazları içerisinde bile O₂ yetersizliği nedeniyle yüksek miktarlarda CO bulunur.

Yanma sırasında, alev cephesinin iç tarafından ulaşılan yüksek sıcaklık bölgesinde çok miktarda CO oluşur. Ancak daha sonra gazların genişlemesi ve soğuması sırasında, oksidasyon sonucu karbon monoksitler karbon dioksit'e dönüşür. Yanma odası sıcaklıklarının genişleme esnasında düşmesi halinde, denge reaksiyonu sıcaklıktaki düşüşü takip edemediğinden egzoz gazları içerisindeki CO miktarı beklenenden daha fazla olur.



Olarak tanımlanan bu denge reaksiyonu sıcaklığa bağlı olarak oluşmaktadır. Bu nedenle yanma odasının sıcaklığının düşürülmesi CO oluşumunu azaltmaktadır.

Hava-yakıt oranının CO emisyonu üzerindeki etkisi benzin motorlarında oldukça büyüktür. Hava-yakıt oranı arttıkça düşük sıcaklıklarda özellikler CO₂ oluşumunu sağlayan denge reaksiyonunun hızı düşük olduğu için CO'nun mol kesri artar.

Dizel motorlar genellikle fakir karışımlarla çalıştıkları için CO emisyonu azdır. Yakıt demetinin civarında, yanmanın gerçekleştiği bölgede karışım yerel olarak zengindir. Ancak genel yanmada fakir karışımın mevcudiyeti CO emisyonunu düşük seviyelerde kalmasını sağlar.

2.9.2. Azot oksitler (NO_x)

Yanma sonucu ulaşılan sıcaklıklarda, havanın içerisindeki azotun oksijen ile birleşmesi sonucu azot oksitler meydana gelir. NO_x içerisinde ana eleman olarak genellikle NO bulunur. Egzoz gazlarının daha sonra atmosfere atılması sonucu serbest oksijen ile temas etmesiyle NO'ların bir kısmı NO₂'ye, geriye kalan kısmı ise NO₃'e dönüşür. Bu bakımdan NO_x oluşumunu etkileyen iki önemli parametre yanma odası sıcaklığı ve hava-yakıt oranıdır. Ayrıca kimyasal reaksiyon hızları da etkilidir. Ancak hız katsayıları sıcaklığa göre değiştiği için dolaylı yoldan yine yanma odası sıcaklığı etkilidir.

Kimyasal denge hesapları sonucu saptanan NO_x miktarı, motordaki yanma koşullarında elde edilen miktarlarla uyuşmamaktadır. Çünkü motor koşullarında, yanma ürünlerinin dengeye ulaşması için yeterli zaman yoktur. Reaksiyon hızları sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle ulaşılan en yüksek sıcaklık değerinde NO_x için kimyasal denge sağlanamadan yanmış gazların sıcaklığında düşüş meydana gelir.

Kimyasal denge durumundan diğer bir sapmada, yanmış gazların soğuması sırasında meydana gelir. Sıcaklığın düşmesi ile NO_x'lerin tekrar N₂ ve O₂'ye ayrışması beklenirken, reaksiyon hızının düşük sıcaklıklarda çok küçük olması nedeniyle bu reaksiyonlar da yavaşlar. Böylece daha yüksek sıcaklıklarda elde edilmiş olan NO_x miktarları dondurulmuş olur. Başlangıçta, NO_x miktarları reaksiyon hızlarının denge durumlarındaki koşulları sağlayacak kadar fazla olmaması denge durumuna göre düşük

olmaktadır. Belli bir zaman aralığından sonra ise, sıcaklıkların düşmesi sonucu reaksiyonlar donar ve egzoz gazları içerisindeki miktar daha önce ulaşılan maksimum sıcaklık miktarına orantılı bir seviyede kalır. Çünkü azot oksitlerin oluşumu ayrıca reaksiyon hızına ve reaksiyonların tamamlanması için mevcut zamana bağlıdır.

Azot oksit oluşumu aynı zamanda oksijen miktarına da bağlıdır. Bu nedenle zengin karışımlarda NO seviyesi düşmektedir. Maksimum değer ise %10 fakir karışımlarda ulaşılmaktadır. Karışımın hava miktarı çok fazla olduğu durumlarda ise, yanma sıcaklığı düşeceği için NO miktarı da düşer.

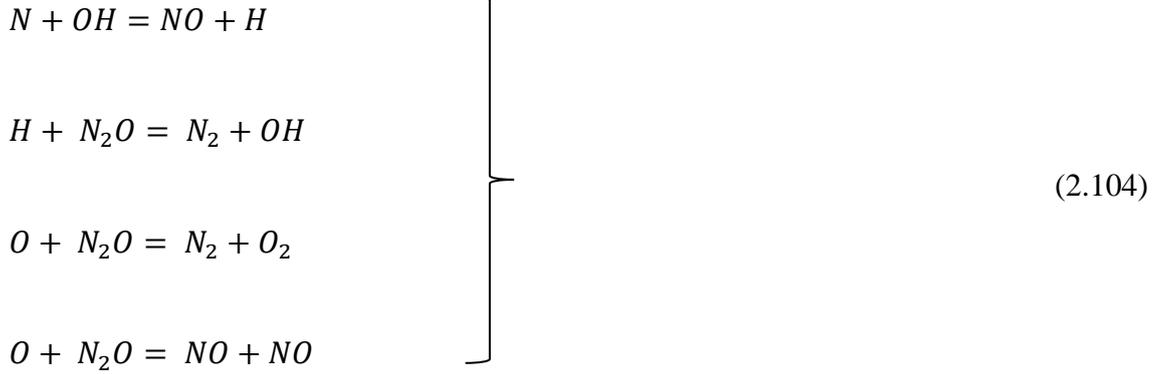
Azot oksit oluşumunu sağlayan ana denklem,



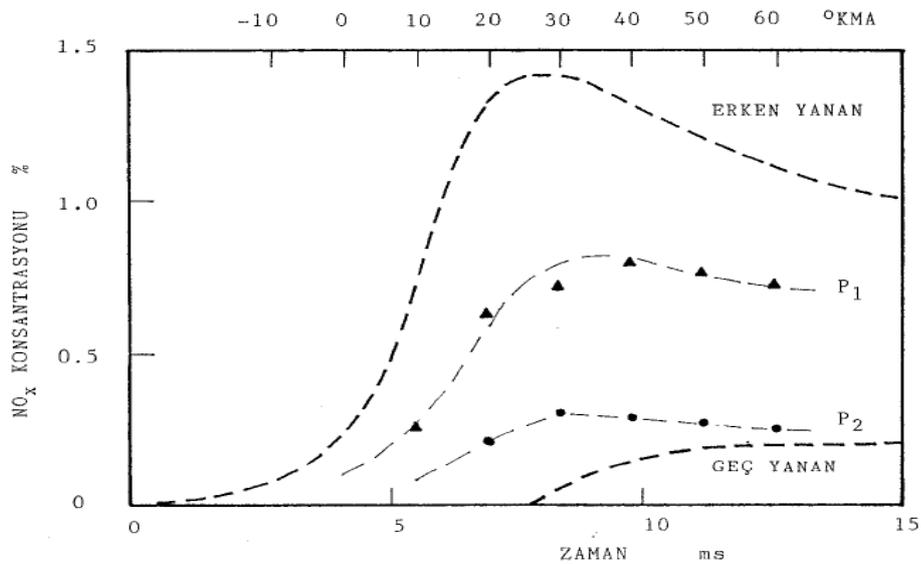
şeklinde tanımlanmıştır. Ancak bu reaksiyon, olayı tam olarak tanımlayamadığından azot oluşum reaksiyonu, diğer kombinasyonlarının da dikkate alınarak açık bir şekilde yazılmış hali denklem (2.103)'te verilmiştir.



Azot oksit oluşum reaksiyonlarında serbest oksijenden ziyade hidroksit bünyesindeki oksijenin de reaksiyona katılabilmesi mümkün olduğundan daha geniş azot oksit oluşum reaksiyonları denklem (2.104)'te verilmiştir.

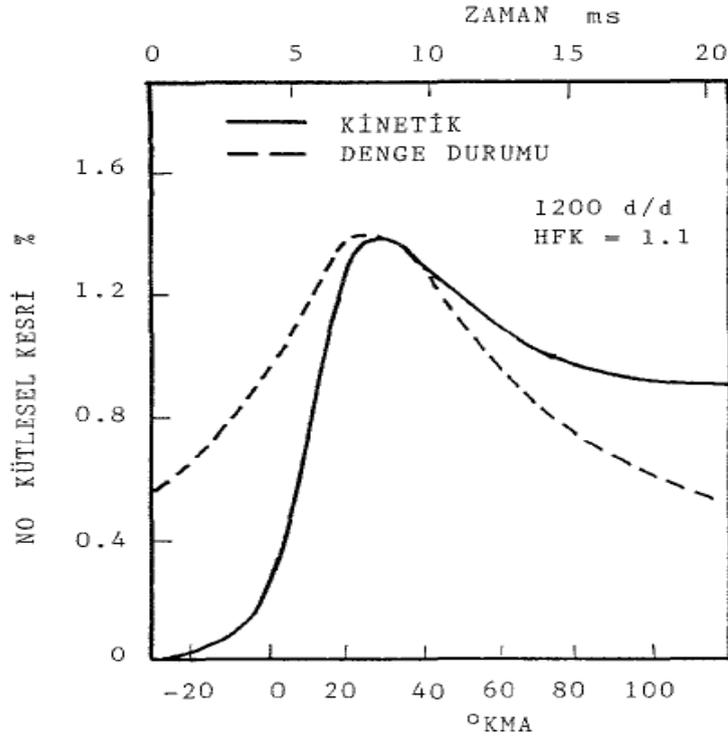


Benzin motorlarında NO oluşumu temel prensiplere uygun olarak gerçekleşmektedir. Alev cephesinin ilerlemesi ile yanan karışımın bulunduğu bölgede NO oluşumu da başlamaktadır. Yanma tamamlanıp, alt ölü noktaya doğru hareketi ile yanmış gazlar genişlemeye ve soğumaya başladığında ise NO oluşumu durmaktadır. Bujiye daha yakın bölgelerde yanma daha erken başladığından, NO oluşumu için tanınan zaman da daha fazla olmaktadır. Sonuç olarak bu bölgelerdeki NO miktarı daha fazla olmakta ve yanma odasında farklı NO konsantrasyonları meydana gelir. Şekil 2.3'te bir CFR deney motorunda spektroskopik teknik ile açılan iki pencereden ölçülen NO konsantrasyonları görülmektedir. Burada P₁ penceresi, bujiye P₂ penceresinden daha yakın bir konumda bulunduğundan buradaki NO miktarı daha fazladır.



Şekil 2.3. Yanma odasında farklı konumlardaki NO konsantrasyonları değişimi

Ayrıca, Şekil 2.3'te erken ve geç yanan karışımlar için konsantrasyonun zamana göre değişimi ve “donma” konumları gösterilmektedir. Hesap yoluyla elde edilen bu eğrilerde, reaksiyon hızının zaman içerisinde değişimi dikkate alınmıştır. Denge durumu kabul edildiğinde buradaki konsantrasyon eğrileri, azalan sıcaklıklar birlikte düşecektir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4. Azot oksit konsantrasyonunun zamana göre değişimi

Dizel motorlarındaki heterojen yanmada, önce hazırlanmış bir karışım bulunmamakta, yakıt ile havanın karışımı ve yanma olayları iç içe gerçekleşmektedir. Bu durumda NO oluşumunu belirleyen kimyasal reaksiyonlar değişmediği halde ortamın fiziksel şartları farklılık göstermektedir. Yakıt damlasının buharlaşması ve yanma sonucu damlacık etrafında oluşan alev bölgesinde yüksek sıcaklıklar mevcuttur. Damlacıktan uzaklaşıldıkça sıcaklık düşerken, oksijen konsantrasyonu artmaktadır. Bu nedenle benzin motorlarındaki homojen karışıma oranla, dizel motorlarındaki durum daha karmaşıktır. Burada toplam NO oluşumu sıcaklığa ve damlacık etrafındaki akış alanını etkileyen birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca dizel motorlarda

karışım oranı, motorun yük durumuna göre değiştirildiğinden, artan yük ile birlikte azot oksit miktarı da artar.

2.9.3. Hidrokarbonlar (HC)

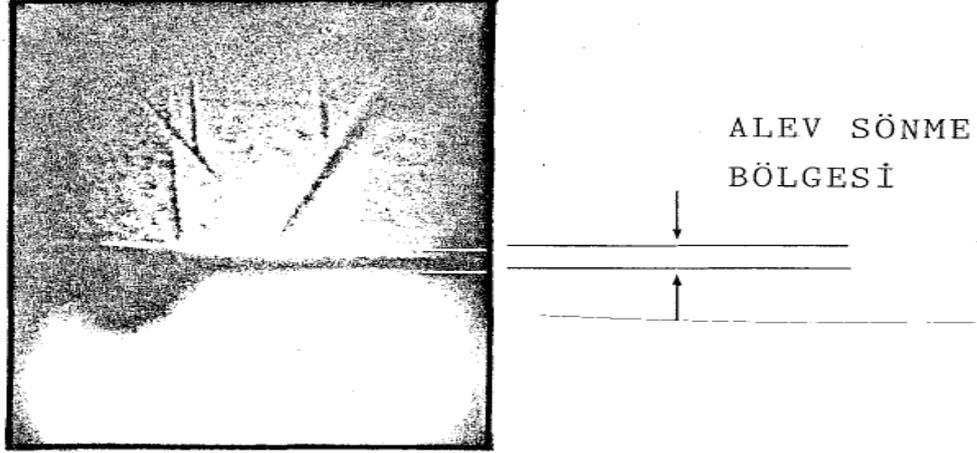
Egzoz gazlarında bulunan hidrokarbonların oluşumu, sıcaklıkların ve oksijenin yetersiz olması gibi etkenler sonucunda yanmanın tamamlanamamasıdır. Bu durum,

- Yerel karışım oranının çok fakir veya çok zengin olması sonucu oksidasyon reaksiyonlarının çok yavaş olması ve alevin ısı kayıpları nedeniyle sönmesi,
- Yanma odasının çeşitli bölümlerinde bulunan karışım için yüzey/hacim oranının büyük olması nedeniyle ısı kayıplarının, buradaki karışımlarının tutuşmasına engel olacak kadar büyük olması,
- Yanma odasının soğuk cidarlarına olan ısı kayıpları nedeniyle bu bölgeye ulaşan alevin anında sönmesi nedenleriyle oluşmaktadır.

Ayrıca çok zengin ve çok fakir karışımlarda buji ile ateşleme işlemi de bazı durumlarda gerçekleşemediğinden, yanmamış HC'ler egzoz gazlarıyla birlikte dışarı atılmaktadır. Yağlama yağının yanma odası cidarlarında oluşturduğu ince film tabakasının yanmasıyla da HC'ler oluşmaktadır. İki zamanlı motorlarda ise süpürme sırasında da bir kısım yakıt daha yanmadan egzoz supabından atılmaktadır.

Genelde, dört zamanlı taşıt motorlarında HC oluşumlarının temel kaynağı cidarlardaki alevin sönmesidir. Motorda yanma olayının fotoğraflarının çekilmesi sonucu, cidarlara yakın bir bölgede hiç yanmanın oluşmadığı görülmüştür. Ateş sönme bölgesi olarak tanımlanan bu soğuk cidar bölgesindeki ısı kayıpları, karışım sıcaklığının tutuşma sıcaklığının altına düşmesine neden olmakta ve ayrıca zincir reaksiyonları kırarak da yanma olayını engellemektedir. Alev sönme bölgesi (Şekil 2.5) kalınlığı, karışım

sıcaklığı, basınç, karışım oranı, cidar sıcaklığı, cidar malzemesi ve cidar üzerindeki birikintilerin etkisi ile değişmektedir.



Şekil 2.5. Yanma odası cidarlarındaki alev sönme bölgesi fotoğrafı

Karışımın zengin ya da fakir olmasını sağlayan yakıt-hava karışımı da HC'lerin oluşmasında etkilidir. Eküvalans oranının 1'den büyük olduğu durumlarda yeterli oksijen bulunmadığı için eksik ve dengesiz yanma sonucu, eküvalans oranının 1'den küçük olduğu durumlarda ise, havanın içerisindeki fazla azot sistemden ısı çekeceği için yanma odasının sıcaklığını düşürmesi sonucu HC'ler oluşmaktadır.

2.9.4. Kükürt oksitler (SO_x)

Yakıt içerisinde bulunan kükürt miktarına bağlı olarak, özellikle dizel motorlarda, yanma sonucu kükürdün hava ile birleşmesi ile SO₂ oluşur. Daha sonra egzoz gazları içindeki su buharı ile SO₂ birleşmesi sonucu, silindir içinde ve atmosfere atıldıktan sonra H₂SO₄ (sülfürik asit) oluşur. Oluşan sülfürik asit motor elemanlarının korozyonuna neden olur. Atmosfere atılan sülfürik asit ise asit yağmurlarına neden olur ki çevre için çok tehlikeli durumlara neden olabilir. Kükürt oksitler oluşumu önlemek için ya kükürt ihtiva etmeyen yakıtlar kullanılmalı veya kükürt tutucu kimyasallar ile kükürdün atmosfere salımını önlenmelidir. Fakat kükürt tutucular ile kükürdün

atmosfere salımını önlese bile motor elemanlarına vereceği zararları önleyemez. Dolasıyla kükürt ihtiva etmeyen yakıtların kullanımı daha sağlıklıdır.

2.9.5. Partikül maddeler

Dizel motorlarında meydana gelen difüzyon alevinde, genel olarak hidrojenin karbona oranla oksijene karşı daha aktif olması nedeniyle, yanmanın tamamlanması için zaman ve özellikle oksijen bulunmadığı durumlarda is oluşacaktır. İis böyle durumlarda meydana gelen katı karbon tanecikleridir. Motorun yük durumuna göre değişen hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak oluşan is miktarı değişeceğinden motorun gücünü de sınırlayan bir faktördür.

Genelde is oluşumu dizel yanmasının bir safhasıdır. Bu nedenle başlangıçta oluşan karbonun büyük bir kısmı tekrar yanar. Ancak gücü artırmak amacıyla yanma odasına fazla miktarda yakıt gönderildiğinde, yeterli oksijen bulunmadığı için egzoz gazları içerisinde bir miktar is bulunacaktır.

İis oluşumu silindirin aşınmasına, segman yuvalarının karbonla dolarak zarar görmesine neden olmaktadır.

Aşırı zengin karışımlarla çalışma koşulları dışında benzin motorlarında is oluşmaz. Ancak yakıtın ve yağlama yağının yanması sonucu yanma odası cidarlarında karbon birikintileri oluşmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Matlab

Bir mühendisin ya da bilim adamının kendi alanında ya da kendi alanı ile ilişkili yan alanlarda kullanabileceği yazılım dilleri arasındaki en gelişmiş dil Matlab dilidir. Programın açılımı “Matrix ve Laboratory” kelimelerinin birleşiminden gelmektedir. Programlama yapısı olarak diğer dillere nazaran farklı ama algoritma olarak aynı sayılır. O yüzden C dilini bilen bir kullanıcının bu dili öğrenmesi çok kolaydır.

Matlab, ilk olarak Cleve Moler tarafından yazılmıştır. Daha sonra matris algoritmasının yazılmasına dışarıdan katkıda bulunulmuştur. İlk yazılım esnasında kullanılan dil Fortran programlama dilidir. Fakat şu an ki sürümleri C dili altında yazılmaktadır.

Matlab, sayısal analiz ve lineer cebir ile ilgilenenler için hazırlanmış yüksek performanslı bir programlama dilidir. Bu programda matematiğin tanıdık belirtileri ve sembolleri kullanılmıştır. Matematik ve analiz, ileri sayısal analiz, modelleme, mühendislik diyagramları, grafiksel kullanıcı ara yüzü, bu programın bazı uygulamalarındandır.

Matlab yıllar geçtikçe, farklı alanlardan kullanıcılar ile birleştirilerek geliştirilmiştir. Matlab'in bu gelişimi bu programlama dilini, basit hesaplamalardan karmaşık analizlere kadar birçok alanda kullanılabilir kılmıştır. Matlab “araç kutusu” (Toolbox), hazır fonksiyonlar, m-dosya işleme, ölçme, excel bağlantısı kurma, finansal zaman serileri kullanma, robot kontrolü vb. içerikleri ile kullanıcılarını cezbeden bir programlama dili haline gelmiştir.

Matlab'de yapılması istenen işlemler için yazılacak kodlar ya komut satırına yazılır ya da m-file dosyasına yazılıp komut satırından ilgili m-file dosyası çağırılır. Komut

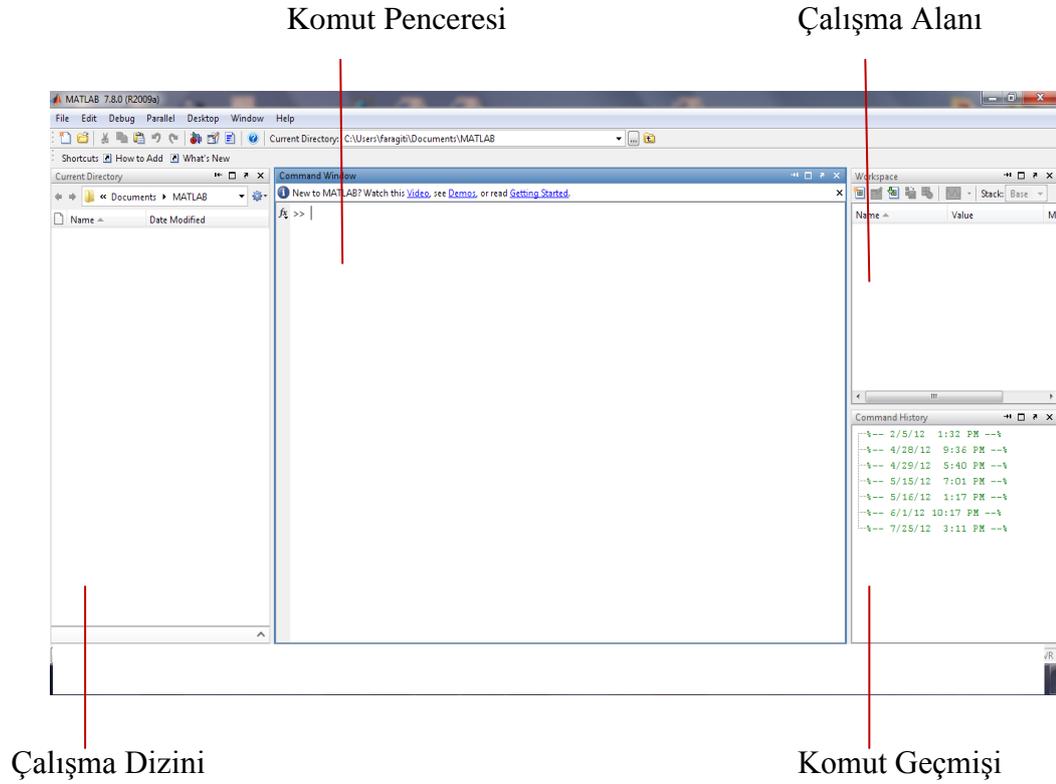
satırına yazılan komut veya ilgili m-file dosyası, yazılan kodlamaya göre sonuçları üretir ve her iki yöntemde de sonuçlar komut satırının olduğu ara yüzden okunur.

Matlab'in hazır fonksiyonlar dışında başka avantajları da vardır, işletim sistemi uyumluluğu, donanım kısıtlamasız görüntüleme, Matlab derleyicisi, grafiksel kullanıcı ara yüzü gibi.

Matlab, aynı zamanda bir yorumlayıcıdır; yani elde edilen sonuçların yorumlaması yapılabilir. Yani sonuçlar için ekrandan sayılarla birlikte alfabetik çıktılar da alınabilir. Dolayısıyla elde edilen bir sonuç, cümlelerle desteklenebilir ya da doğruluk payı ön görülebilir.

Matlab'in bazı dezavantajları da vardır, uygulamaları başlatma süresi diğer programlama dillerine göre daha yüksek, bu sorunun en az seviyeye indirilmesi için çalışmalara devam etmektedir. Diğer dezavantaj ise Matlab'in fiyatının yüksek olmasıdır. Bu problem Matlab kullanıcı sayısının çok yüksek rakamlara ulaşmasını engellemektedir.

Windows ortamında Matlab programını başlatmak için başlat menüsünden veya masaüstünde Matlab ikonuna tıklamak yeterlidir. Matlab açıldığında Şekil 3.1 gibi bir pencere açılır.



Şekil 3.1. Matlab başlatılırken kullanıcı karşısına gelen ilk pencere

Komut penceresi, Matlab ile iletişim kurulan pencere olup, komutların yazılabildiği ve tüm sonuçların çıktılarının alındığı bölümdür. Komut penceresinde “ >> “ şeklinde bir ileti kullanıcı tarafından görüntülendiğinde komut penceresinin kullanıma hazır olduğu anlamına gelir ve artık komut yazılabilir.

Komut geçmişinde o ana kadar girilen komutların tarih ve saat bazında geçmişini gösteren bölümdür. Kullanıcıya geçmiş ile ilgili bilgiler verir.

Çalışma alanı, komut penceresinde, komut satırından veya çalıştırılan bir dosya ile bir hafızada oluşturulan değişkenlerin adlarını, özelliklerini ve tiplerini gösteren bir penceredir.

Çalışma dizini Matlab dosyalarının kaydedildiği, yüklendiği dosyaların bulunduğu klasörü belirlemeye yarar. Belirli bir klasörden bir dosya açıldığında, klasörün

içerisindeki Matlab ile ilgili dosyaların varlığı bu pencereden görülebilir ve aynı dosya içerisindeki diğer dosyaların açılmasına pratiklik sağlar.

Matlab'de komutlar işlemleri ve/veya dosya işlemleri yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Bu noktalardan önemli olanlardan bahsedilirse; komut yazılırken, eğer matematiksel bir formül yazılıyorsa kodlamanın Matlab diline uygun yapılması gerekir, değişken atamaları ve adlandırmalarının Matlab diline uygun yapılması gerekir, dosyaların adlandırılmaları da yine Matlab diline uygun yapılmalıdır.

Çizelge 3.1. Matlab'de bazı fonksiyonların tanımlanması

Fonksiyon	Sembol	Örnek
Toplama, $a + b$	+	$2+3$
Çıkarma, $a - b$	-	$5-2$
Çarpma, $a*b$	*	$7*10$
Bölme, a/b	/	$10/5$
Üs Alma, a^b	^	$a^{(b)}$
Parantez, $a*(b + c)$	()	$3*(6-18)$
Sinüs,	sin	$\sin(\pi/3)$
Kosinüs,	cos	$\cos(\pi/3)$
Tanjant,	tan	$\tan(\pi/3)$
Arksinüs,	asin	$\text{asin}(1)$
Arkkosinüs,	acos	$\text{acos}(1)$
Arktanjanant,	atan	$\text{atan}(2)$
Eksponansiyel,	exp	$\text{exp}(2)$
Tabi Logaritma,	log	$\log(100)$
10 Tabanlı Logaritma	log10	$\log_{10}(100)$
Karekök	sqrt	$\text{sqrt}(625)$
Mutlak değer,	abs	$\text{abs}(-19)$

Matlab'de matematiksel işlemlerde öncelik sırası, 1. sırada parantez, 2. sırada soldan sağa doğru üs alma, 3. sırada soldan sağa çarpma-bölme, 4. sırada soldan sağa doğru toplama-çıkarma işlemi gelmektedir. Eğer verilen bu öncelik sırasına dikkat edilmezse Matlab sonuçları kullanıcının istediği gibi değil, kendi kuralları çerçevesinde üretir.

Matlab'de değişkenler atanırken kodlama önemlidir. Değişken isimleri en fazla 31 karakter içerebilir. Değişken isimleri büyük ve küçük harflere duyarlıdır ve en ufak bir büyük küçük uyumsuzluğunda Matlab farklı bir değişken olarak algılar. Son olarak değişken atamalarında kullanılan karakterler, Türkçe olmayan harfler, sayılar ve noktalama işaretlerinden sadece “_” şeklindedir. Diğer noktalama işaretleri değişken ismi olamaz. Çünkü diğer noktalama işaretinin Matlab için bir anlamı vardır. Örneğin en sık kullanılan “;” işareti, yazılan bir komutun veya değer atamanın hafızaya alınmasını fakat ekrana istenmediği takdirde yazılmamasını sağlar.

Matlab'de dosyalar kaydedilirken de dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Örneğin, adlandırma yapılırken kesinlikle Türkçe karakter kullanılmamalıdır. Bir başka husus adlandırmada Matlab'in hazır komutları (sin, pi, abs, exp vs.) kullanılmamalıdır.

Matlab'de bir hesaplama için algoritma oluşturulabilir. Oluşturan bu algoritmanın içinde, matematiksel formüller, mantık operatörler (eşit midir, büyük eşit, küçük eşit vs.) olabilir. Fakat tekrarlanması gereken işlemlerin tek tek yazılması uzun zaman alır. Matlab bunun gibi tekrar sayısı gerektiren durumlara da çözümler sunmaktadır. Birkaç çeşit döngü fonksiyonu ile tekrarlanması gereken işlemlerin çok kısa sürelerde yapılmasını sağlar. Tablo oluşturma, grafik çizdirme, verileri açılan başka bir dosya adı altında istenilen dosya formatında kaydedebilme gibi birçok konuda kolaylık sağlayan Matlab'in kullanım alanı çok geniştir. Oluşturulan programlar, paket programlar haline getirilerek, sadece ilgili alanlarda kullanılma imkanı sunar. Matlab ortamında hazırlanan örnekler incelendiğinde programın ne kadar pratik çözümler sağladığı daha kolay anlaşılacaktır.

3.2. Matlab GUI

Bir ara yüzü, yazılmış olan bir programı kolayca kontrol edebilmek için oluşturulan bir köprüye benzetilebilir. Bilindiği üzere bir program kapasitesine bağlı olarak yüzlerce ya da binlerce komut satırından oluşmaktadır. Bu kadar komut satırı ile direkt olarak ilişkide olmak bazen karışıklıklara neden olmaktadır. İşte bu noktada ara yüzler imdada yetişmektedir. Ara yüzlerin daha net anlaşılabilmesi için, eğer insanlar program olarak kabul edilirse, ara yüzde insanın dili gibidir. İnsan dili tüm insanın karmaşık yapısının ifade edilmesinde pratiklik sağlıyorsa, ara yüzler de programın tüm karmaşıklığının bir özetidir.

Matlab de diğer grafik tabanlı programlar gibi bünyesine 6. sürümü ve daha sonraki sürümlerinde bünyesine Graphic User Interface (GUI)'yi eklemiştir.

GUI, tipik bir grafiksel ara yüzüdür. Ara yüzde kullanılan bazı elemanlar ile programda istenilen sonuç bir pencere vasıtasıyla kullanıcıya sunulur. Oluşturulan GUI'ler, paket program formatına dönüştürülerek, sadece yazılmış olan konuda kullanım imkanı sunar. Örneğin, kimya endüstrisinde, bir proseste meydana gelen herhangi bir sıcaklığa bağlı olarak basıncın hesaplanması için yazılmış bir program, sadece bu konuda kullanılacağı için paket program haline getirilebilir. Böylece kullanıcıya karmaşık olmayan bir program sunulmuş olur.

GUI de sadece hesaplama yapılmaz, grafik de çizdirilebilir. Çizdirilen grafik ile hesaplama sonucu elde edilen verilerin değişimleri kolaylıkla görülebilir. Böylece verilerin yorumlanması da o derece kolaylaşır.

GUI, Matlab'de yazılmış bir programın sonuçları direkt olarak kullanıcıya sunmaz. Dolayısıyla istenilen hesabın, verinin, grafiğin vs. kullanıcıya sunulması için GUI ortamında da bazı işlemler yapmak gerekir. Yapılması gereken işlemler, GUI bünyesinde bulunan elemanların veya nesnelerin, istenilen işleme uygun

kombinasyonlarının yapılmasıdır. Her elemanın farklı bir işlevi vardır ve amaca uygun elemanın seçiminin yapılması gerekir.

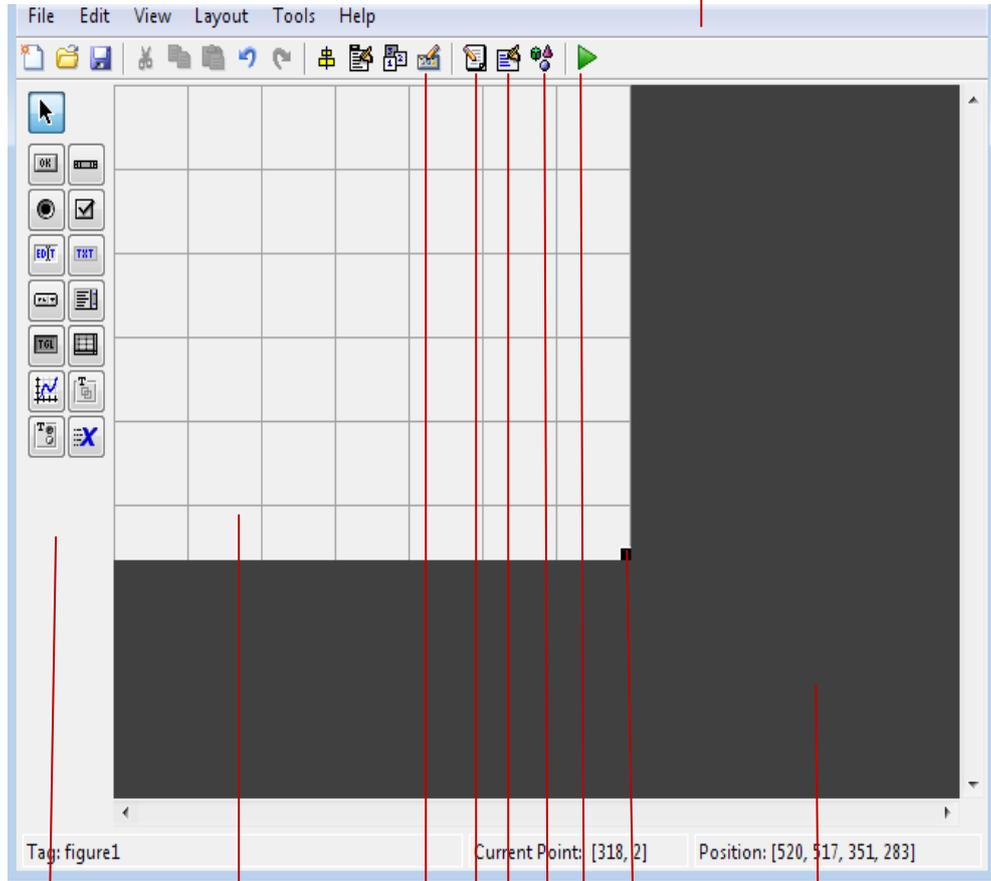
GUI'de yapılacak bir işlem için bir nesne seçildiğinde, o nesneye ait bir m-file dosyası açılır. Bu m-file dosyası, ilgili nesneye ait komutların girildiği, daha doğrusu o nesnenin ne yapması isteniyorsa, ona göre komutların girildiği bir birimdir. Bu birime genellikle, daha önceden yazılmış olan bir program ile ilgili bilgiler verilerek, bu nesnenin altında o programın çalışması sağlanır. Bazen yapılması gereken işlemler bu birime yazılır ve buradan program çalışır.

GUI, için Matlab programının tüm kodlarının bilinmesin gerek yoktur. GUI ile ilgili kodların bilinmesi daha önceden yazılmış bir programın GUI ile birleştirilip, sonuç oluşturulmasında yeterli olacaktır.

Matlab GUI'nin çalışmasında üç temel özellik vardır: GUI yüzeyi, GUI objeleri ve işlevlerdir. GUI yüzeyi, elemanların yerleştirildiği kısımdır. GUI objeleri, programı oluştururken kullanılan buton, axes, slider gibi elemanlardır. Bir nesnenin ne yapması gerektiğini belirten en önemli kısmı işlevler (Callback'ler) kısımdır.

GUI penceresi iki şekilde açılır. Birinci yol, Matlab'in ana sayfası olan komut penceresinde komut satırına GUIDE yazılarak, ikinci yol da File-New-GUI-Blank GUI ikonuna tıklanarak OK'i seçmektir. GUI açıldıktan sonra ilk olarak Şekil 3.11 gibi bir pencere açılır.

Standart Çubuk



- GUI Obje Kutusu
- Figür Yüzey
- Çalışma Penceresi
- Yüzey
- Boyutlandırma
- Kukakacığı
- Program Başlatma
- Düğmesi
- Obje Listesi
- Obje Özellikleri
- Menü Editörü
- Obje Hizalama
- Düğmesi

Şekil 3.2. GUI açıldığında kullanıcı karşısına gelen pencere

Figür yüzey (layout) programcının düzenleme yaptığı bölgedir. Sol tarafta GUI elemanları yer alır. Programcı her birinin üzerine tıklayıp figür yüzeye çekerek her nesneyi kullanabilir. Bu pencerenin üst kısmında araç çubuğu yer alır ve kullanıcıya GUI nesnelarını düzenleme, yüzeyde dağıtma, özelliklerini değiştirme gibi işlemler yapılır.

3.2.1. Matlab GUI'de kullanılan nesnelar ve özellikleri

Push Button: Bir düğme vasfı atanan pushbutton, callback'inin içerisine atanan veya yazılan komutlar doğrultusunda üzerine tıklanıldığında, m-file dosyası içerisindeki komutları icra eder. Örneğın, bir hesap makinesinin “ = “ i gibidir.

Toggle Button: Basmalı düğme pushbuttondan biraz farklı çalışır. Akılda kalıcı bir örnek oluşturmak istenirse, ışık açma-kapama düğmeleri gibi düşünülebilir. Yani seçim yapıldığında eski haline gelmeyen bir düğmedir, basıldığında basılı kalır ve tekrar basılmayana kadar eski haline geri gelmez. Bu nesnenin kullanım gerekliliği açısından düşünıldüğünde, kalın ya da ince harf yazı stili seçilen düğmedir.

Radio Button: Bir buton grubu içerisinde çalışılırken, içlerinden ancak birisinin seçildiği düğmedir. Örnek olarak, cinsiyet seçiminde ya erkek ya da kız olarak seçim yapılabilir. Böyle durumlarda kullanılan bu düğmede, kullanıcıya tek seçin şansı verilir.

Check Box: Radio button gibidir. Fakat kullanıcıya çoklu seçim yapma şansı verilir.

Edit Text: Son kullanıcının veri girişı yapabileceği giriş kutusudur. Örneğın, kullanıcıya yaş sorusu sorulduğunda, bu veri kullanıcı tarafından girilmesi gerekir. Böyle durumlarda kullanılan bir nesnedir.

Static Text: Bu nesne ise kullanıcıya bildirim yapmak üzere kullanılan değiştirilmez ya da silinmez bir takım yazı kümelerinin oluşturulduğu bölümdür. Bu bölümün geniş

kullanım alanı vardır. Örneğin, başlık yazmada, bir nesnesin yanına adını yazmada, birim ifadelerinde vs. gibi durumlarda sık sık kullanılan bir nesnedir.

Pop-up Menu: Bir seçim kutusudur ve aşağı doğru genişleyerek içerisinden istenilen verinin seçilmesini sağlayan nesnedir. Seçilmek istenen verinin üzerine tıklandığında eski haline gelerek küçülür ve seçili olan veriyi gösterir.

List Box: Aynı genişleyen menü çubuğu gibi bir seçim penceresi oluşturur. Tek farkı ebatlarının belirlenebilir olmasıdır. Eğer içeriği ebatlarından fazla olursa, otomatik olarak sağ tarafında oluşan kaydırıcı ile aşağıdaki verilere ulaşılabilme imkanı sağlar.

Axes: Bu ögenin de kullanım alanı hayli geniştir. Basit uygulamalardan ileri seviye uygulamalara doğru bakıldığında, grafik görüntüleme, resim görüntüleme, ekran oluşturma ve düğme oluşturma gibi birçok özelliğe sahiptir. İleri seviye bir ara yüz oluşturulurken düğme oluşturmak için bu nesne kullanılır.

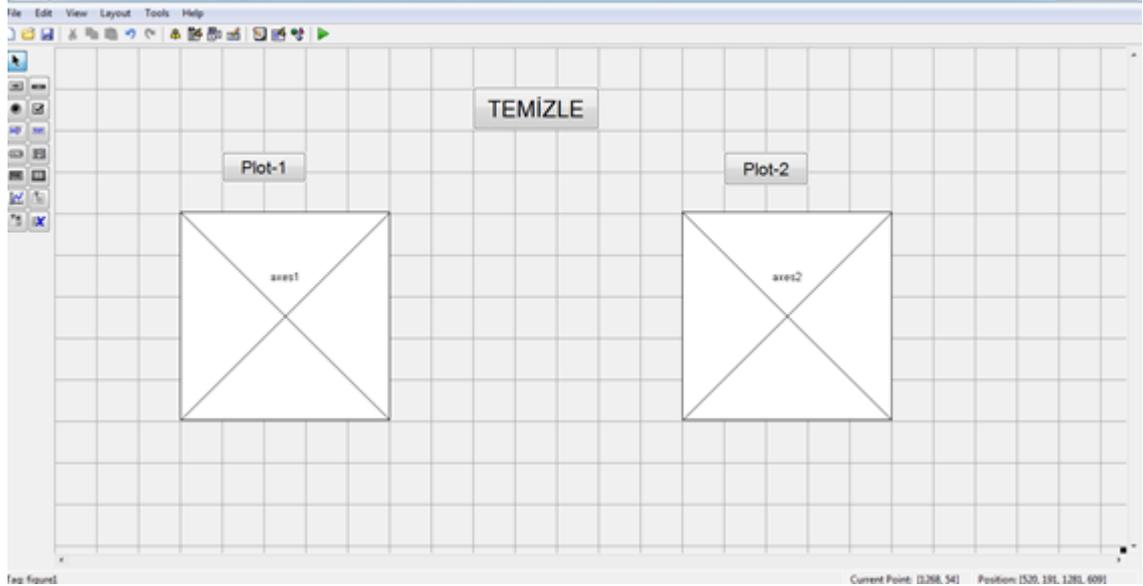
Paneller: Bir takım gruplandırma yapılmak istendiği zaman, bize yardımcı olan bir nesnedir. Bir panel oluşturarak, diğer öğelerin üzerinde oluşturulabilme imkanı sağlar.

Düğme Grup Paneli: Seçmeli düğmelerdeki geri bildirimleri almak için kullanılan bir nesnedir. Bu panel sayesinde hangi düğmenin seçilip, hangi düğmenin seçilmeyeceğine dair veriler alınır. Fakat seçim bölümünde yazılım yapılırken sadece bu panelin kullanılması gerekmez de büyük kolaylıklar sağlayan bir nesnedir.

Şimdiye kadar anlatılan bilgiler ve nesnelere, kolay bir şekilde ara yüz oluşturma imkanı mevcuttur.

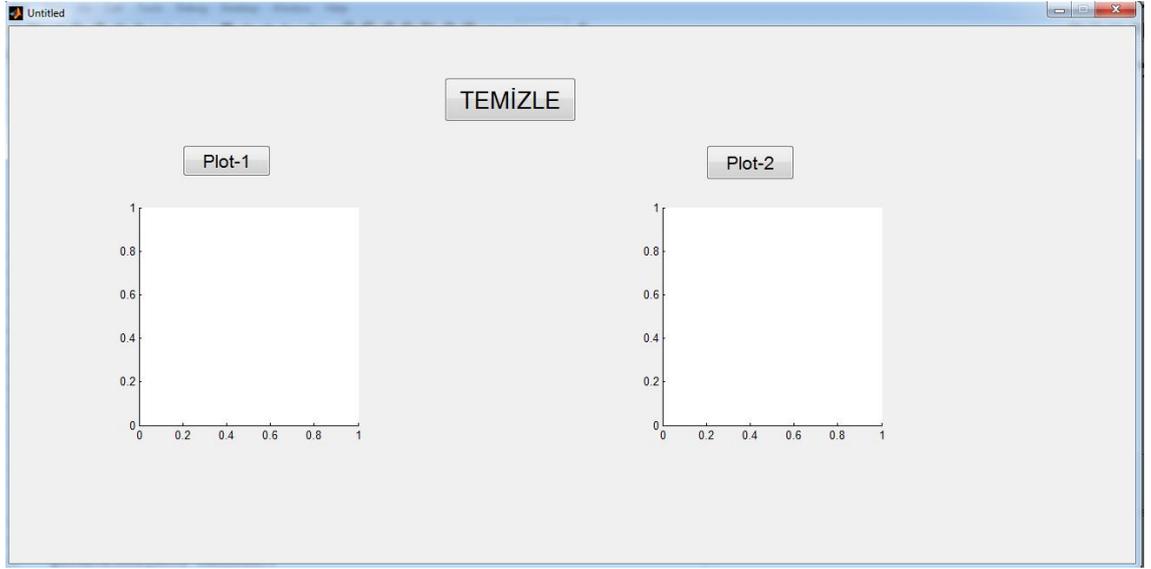
3.2.2. Matlab GUI'de oluşturulan bazı örnekler

Örnek 3.1.



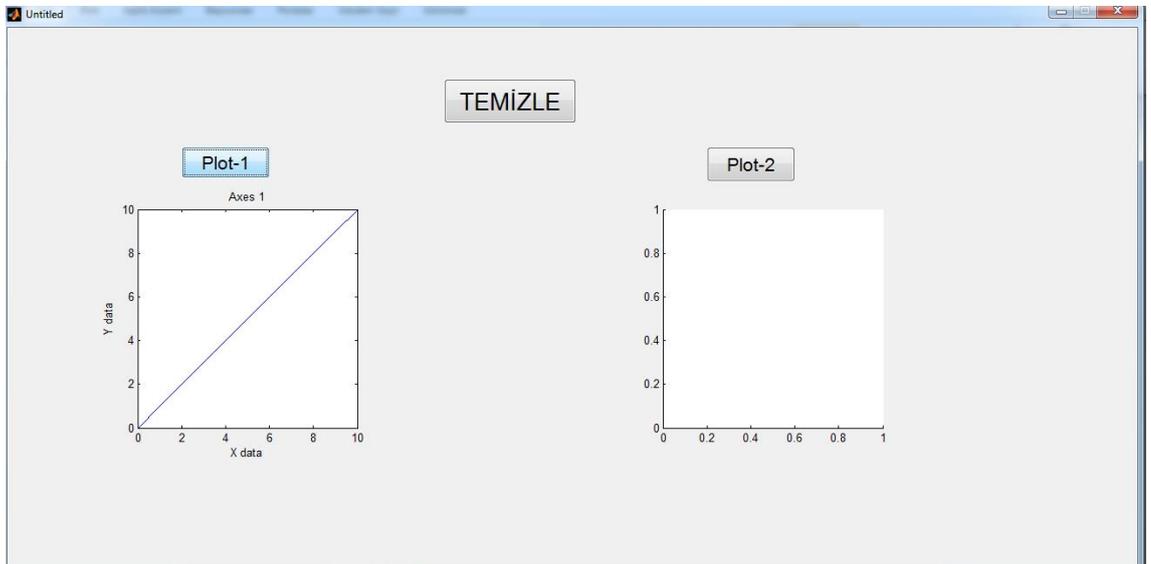
Şekil 3.3. GUI ile oluşturulan bir ara yüz örneği

Şekil 3.12'de gösterilen bir ara yüzün oluşturulması için gereken nesnelere 3 adet Push Button ve 2 adet Axes'dir. Bunları GUI yüzeyine yerleştirdikten sonra Push Button'ların üzerlerine çift tıklanarak özelliklerinin açılması sağlanır. Açılan penceredeki (Inspector) String kısmından nesnenin adı değiştirilir. Aynı zamanda FontSize kısmından da yazı boyutu değiştirilir. Diğer 2 adet Push Button için de bu işlemler yapılır. Daha sonra GUI kaydedilir. GUI kaydedilince, bu GUI'ye ait m-File dosyası otomatik olarak açılır. Bu m-file dosyasında Push Buttonlar'ın altına ilgili programlar yazılarak kaydedilir. Daha sonra program çalıştırılır.



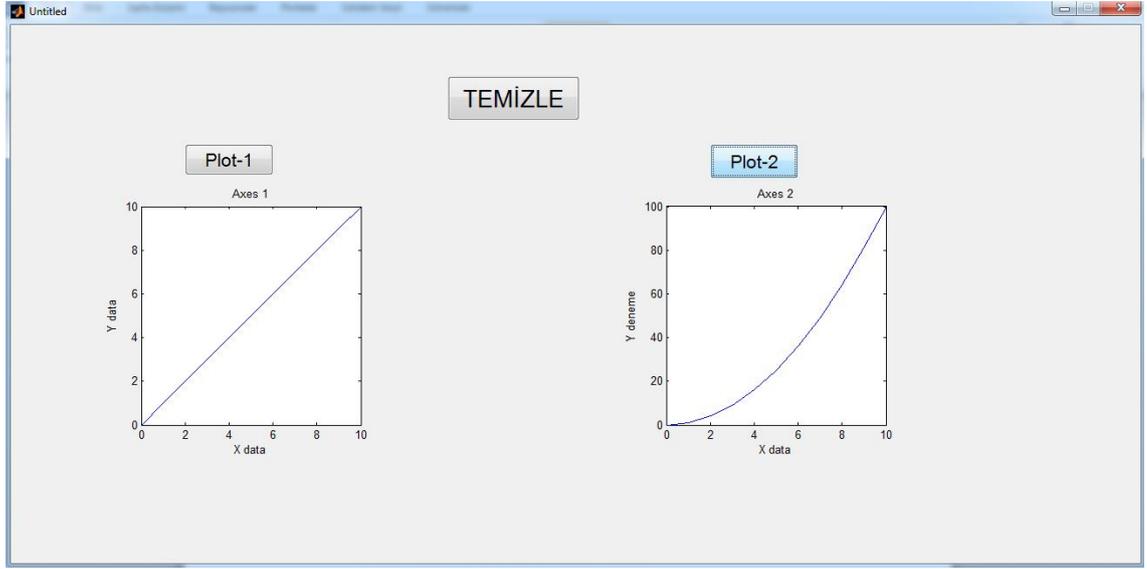
Şekil 3.4. Örnek 3.1 için GUI ile oluşturulan ara yüzün ilk hali

Program çalıştırıldığında önümüze gelen ilk pencere Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Plot-1 ikonuna tıkladığında ara yüzde çizdirilen grafik Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Örnek 3.6 için GUI ile oluşturulan ara yüzün ilk sonucu

Plot-2 ikonuna tıkladığında elde edilen grafik için ara yüzün görüntüsü Şekil 3.6'te gösterilmiştir.

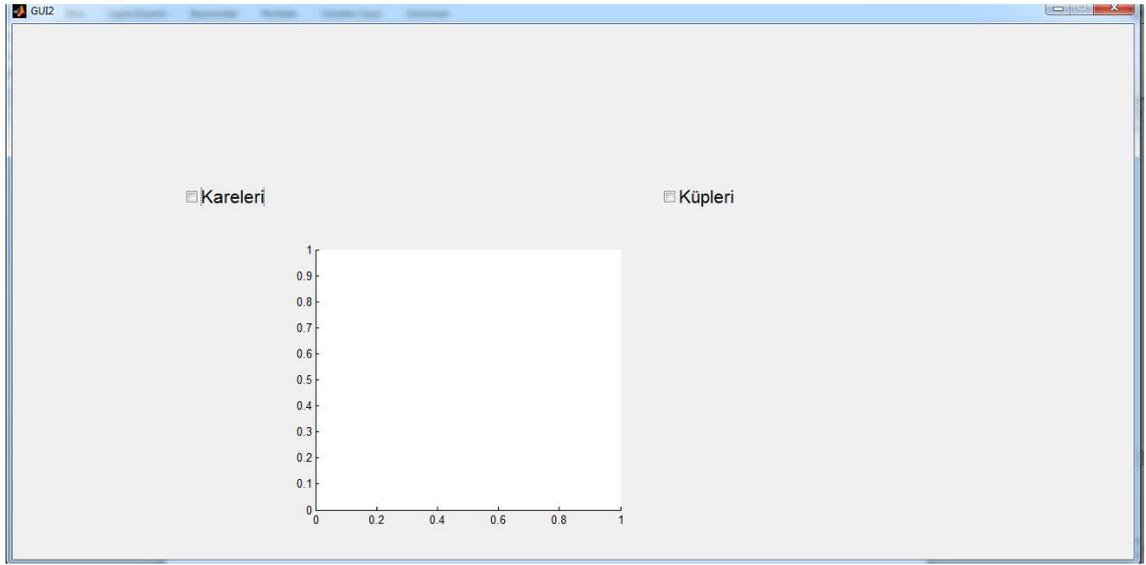


Şekil 3.6. Örnek 3.1. için GUI ile oluşturulan ara yüzün ikinci sonucu

Ara yüzdeki TEMİZLE ikonuna tıklandığında ise daha önce oluşturulmuş 2 grafiği de siler ve ara yüzü ilk haline getirir. (Şekil 3.4)

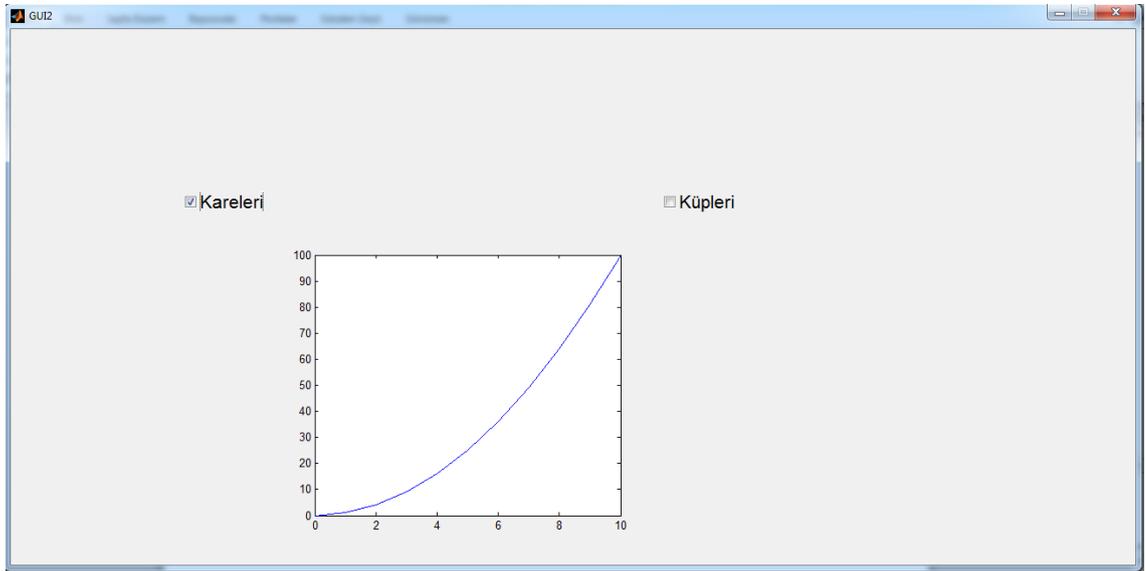
Örnek 3.2.

Şimdi Örnek 3.1'e benzer bir örnekte de, 2 adet Check Box ve 1 adet Axes nesnesi kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.7'deki gibi gerekli nesnelere yerleştirildikten sonra ara yüz kaydedilerek m-file dosyasının açılması sağlanır. Check Box'ların callback'lerine ilgili kodlar yazıldıktan sonra program çalıştırılır.



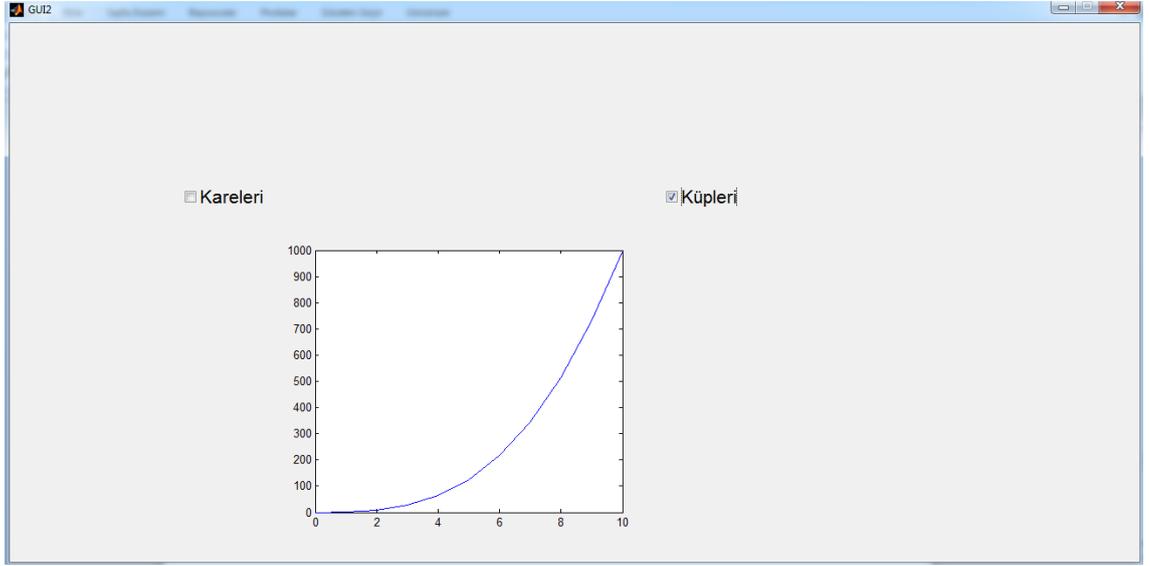
Şekil 3.7. Örnek 3.2 için GUI ile oluşturulan ara yüzün ilk hali

Ara yüzde kareleri ikonuna tıklandığında elde edilen sonuç Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Örnek 3.2 için GUI ile oluşturulan ara yüzün ilk sonucu

Daha sonra kareleri ikonuna tekrar tıklanıp tik kaldırıldığında ara yüz ilk haline tekrar döner. (Şekil 3.7). Küpleri ikonuna tıklandığında ise elde edilen grafik Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Örnek 3.2 için GUI ile oluşturulan ara yüzün ikinci sonucu

Yine küpleri ikonuna tıklanarak tik kaldırıldığında ara yüz yine Şekil 3.7'deki gibi ilk haline dönüşür.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde oluşturulan grafik kullanıcı ara yüz tanıtılacaktır. Ardından belirli parametrelerin değişimi ile ortaya çıkan sonuçlar üzerinden modelin sonuçları tartışılacaktır.

4.1. Oluşturulan Grafik Kullanıcı Ara Yüz Programı

Şekil 4.1’de Matlab GUI’de oluşturulan GUI figür yüzeyi görülmektedir. Oluşturulan figür, farklı sıcaklık, basınç ve hava fazlalık katsayısı değişkenleri için yanma ürünlerinin kompozisyonlarının ve termokimyasal özelliklerinin hesaplanmasında, girdi parametreleri ile çıktı parametrelerinin yazılacağı statik ve edit text’ler ile belirli sıcaklık ve basınç aralıkları için 10 grup grafiklerin çizdirilmesi için check box’lar ve hesaplama yaptırabilmek için gerekli olan bir adet pushbutton’dan oluşmaktadır.

The screenshot shows a Matlab GUI for combustion calculations. The interface is organized into several functional areas:

- Giriş Parametreleri (Input Parameters):** Contains input fields for Basınç [kPa] (101.3), Sıcaklık [K] (2000), Hava Fazlalık Katsayısı (0.8333), Yakıttaki Karbon Sayısı (7), Yakıttaki Hidrojen Sayısı (17), Yakıttaki Oksijen Sayısı (0), and Yakıttaki Azot Sayısı (0). Below these are checkboxes for C, H, O, and N.
- Türler (Species):** A vertical list of chemical formulas: CO2, H2O, N2, O2, CO, H2, H, O, OH, and NO.
- Mol Fraksiyonları (Mole Fractions) and Mol Sayıları (Mole Numbers):** Two columns of input fields for each species.
- Grafikler (Plots):** A grid of 10 checkboxes for selecting different plots:
 - Mol Fraksiyonu-Sıcaklık Grafiği
 - Mol Sayısı-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Molar İç Enerjisi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Kütleli İç Enerjisi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Molar Entalpisi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Kütleli Entalpisi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Molar İç Enerjisi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Kütleli İç Enerjisi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Molar Entropisi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Kütleli Entropisi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Özgül Hacmi-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Toplam Mol Sayısı-Sıcaklık Grafiği
 - Karışımın Moleküler Ağırlığı-Sıcaklık Grafiği
- Hesaplama (Calculation):** A 'HESAPLA' button and temperature range inputs (T_ilk: 600, T_son: 3000).
- Çıktılar (Outputs):** Fields for 'Karışımın Toplam Mol Sayısı' and 'Karışımın Moleküler Ağırlığı'.

Şekil 4.1. Çalışma kapsamında oluşturulan Matlab GUI ara yüzü

Şekil 4.1’deki ara yüz oluşturulup, ara yüzde yar alan her bir GUI ara yüzü fonksiyonelliğini oluşturan gerekli programlar ile entegrasyonu sağlandıktan sonra hazır

hale gelmiştir. Sıcaklık parametresinin değiştirilmesi ise atmosfer basıncında değişen yanma kompozisyonlarının, karmaşık hesaplardan ziyade pratik bir şekilde hesaplanabilir hale gelmiştir. Programda girdi parametreleri olarak sıcaklık, basınç hava fazlalık katsayısı ve yakıtın bileşimi olup, çıktı parametreleri olarak, yanma sonu ürünleri olan (tek bir sıcaklık değerinde) CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , CO , H_2 , H , O , OH , NO türlerinin mol fraksiyonları ve mol sayıları, karışımın molar ve kütleli iç enerjisi, karışımın molar ve kütleli entalpisi, karışımın molar ve kütleli entropisi, karışımın spesifik hacim, karışımın toplam mol sayısı ve karışımın molekül ağırlığı elde edilir. Giriş parametresi sıcaklık değiştirildiğinde elde edilen sayısal veriler de değişmektedir. Örnek bir hesaplama sonuçları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Giriş Parametreleri		Türler	Mol Fraksiyonları	Mol Sayıları	
Basınç [kPa]	101.3	CO2	0.084495	4.289	h [kJ/kmol]
Sıcaklık [K]	2000	H2O	0.14676	7.4497	h [kJ/kg]
Hava Fazlalık Katsayısı	0.8333	N2	0.6944	35.2477	u [kJ/kmol]
Yakıttaki Karbon Sayısı	7	O2	4.2075e-006	0.00021357	u [kJ/kg]
Yakıttaki Hidrojen Sayısı	17	CO	0.053409	2.711	s [kJ/kmolK]
Yakıttaki Oksijen Sayısı	0	H2	0.020494	1.0403	s [kJ/kgK]
Yakıttaki Azot Sayısı	0	H	0.00023046	0.011698	v [m³/kg]
		O	1.3538e-006	6.8718e-005	Karışımın Toplam Mol Sayısı
		OH	0.00016408	0.0083288	50.7598
		NO	3.4187e-005	0.0017353	Karışımın Moleküler Ağırlığı
					27.3435

HESAPLA T_ilk T_son
600 3000

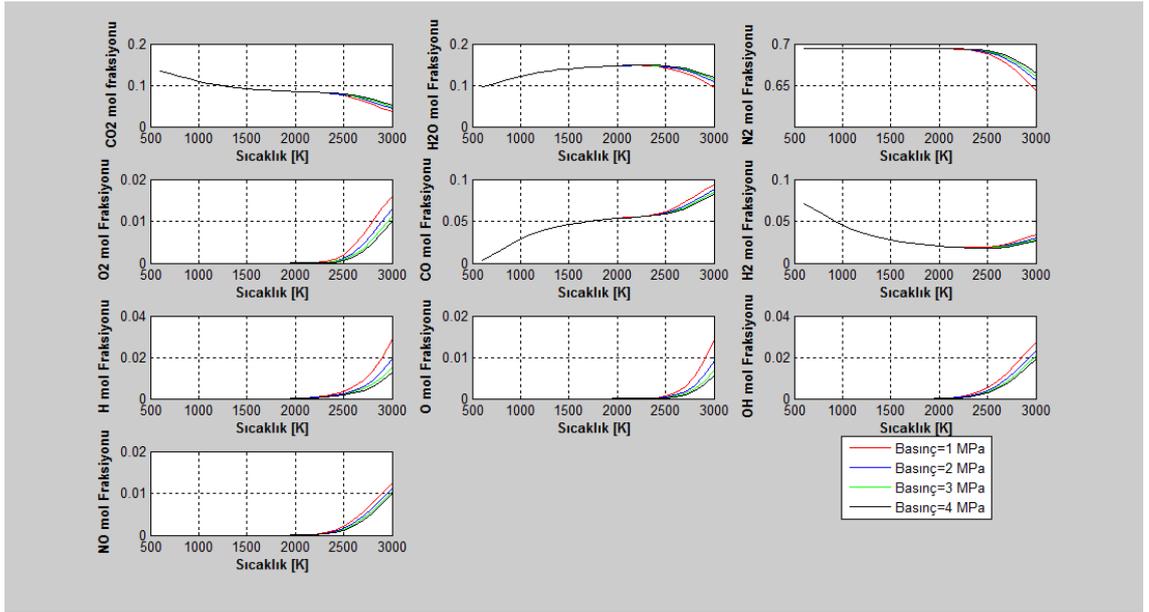
GRAFİKLER

- Mol Fraksiyonu-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Molar İç Enerjisi-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Özgül Hacmi-Sıcaklık Grafiği
- Mol Sayısı-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Kütleli İç Enerjisi-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Toplam Mol Sayısı-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Molar Entalpisi-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Molar Entropisi-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Moleküler Ağırlığı-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Kütleli Entalpisi-Sıcaklık Grafiği
- Karışımın Kütleli Entropisi-Sıcaklık Grafiği

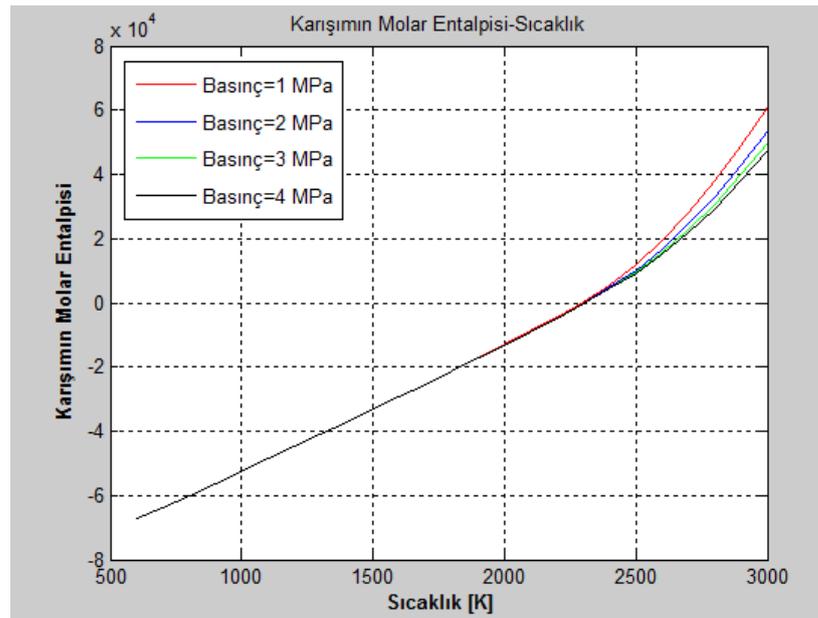
Şekil 4.2. Çalışma kapsamında oluşturulan ara yüzde örnek bir hesaplama

Oluşturulan ara yüzün fonksiyonelliği sadece hesaplama odaklı olmayıp, aynı zamanda çıktı parametreleri olan; CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , CO , H_2 , H , O , OH , NO türlerinin mol fraksiyonları ve mol sayıları, karışımın molar ve kütleli iç enerjisi, karışımın molar ve kütleli entalpisi, karışımın molar ve kütleli entropisi, karışımın spesifik hacmi, karışımın toplam mol sayısı ve karışımın molekül ağırlığının sayısal değerlerinin 600 K ve 3000 K sıcaklık aralığında 1 ile 4 MPa basınç aralığında grafiklerinin oluşturulmasına da olanak sağlamaktadır. Grafiklerin oluşturulmasında kullanılan check

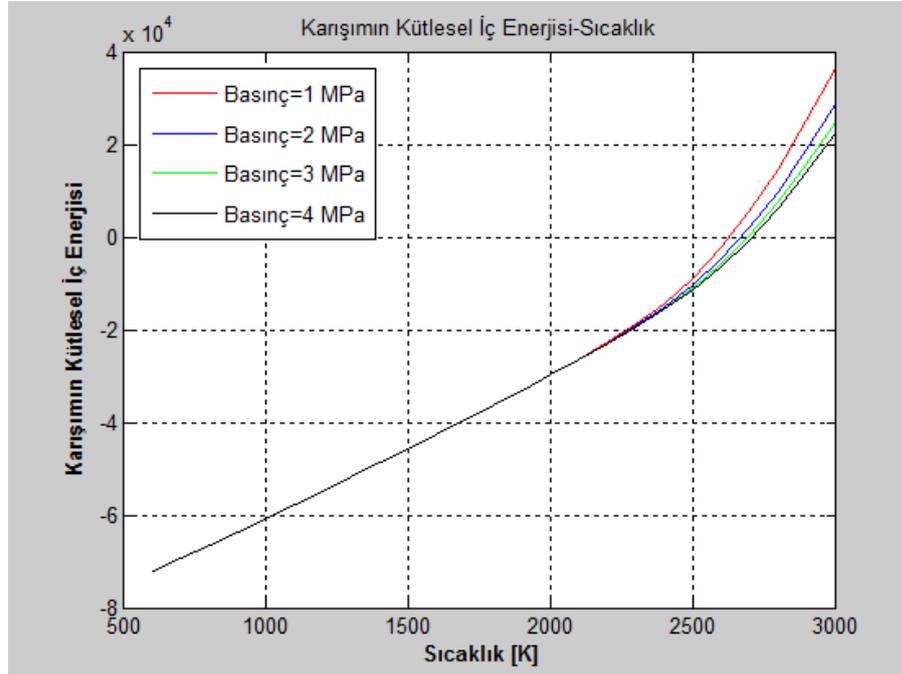
box'larla ve static text'ler vasıtasıyla istenilen grafik check box'a tıklanarak aktif edilebilir, tekrar tıklanarak da pasif edilebilir. Oluşturulan ara yüz ile çizdirilen grafiklerin örnekleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Grafikler 600 ile 3000 K sıcaklıklar arasında ve 1 ile 4 MPa basınç aralığında oluşturulmuştur.



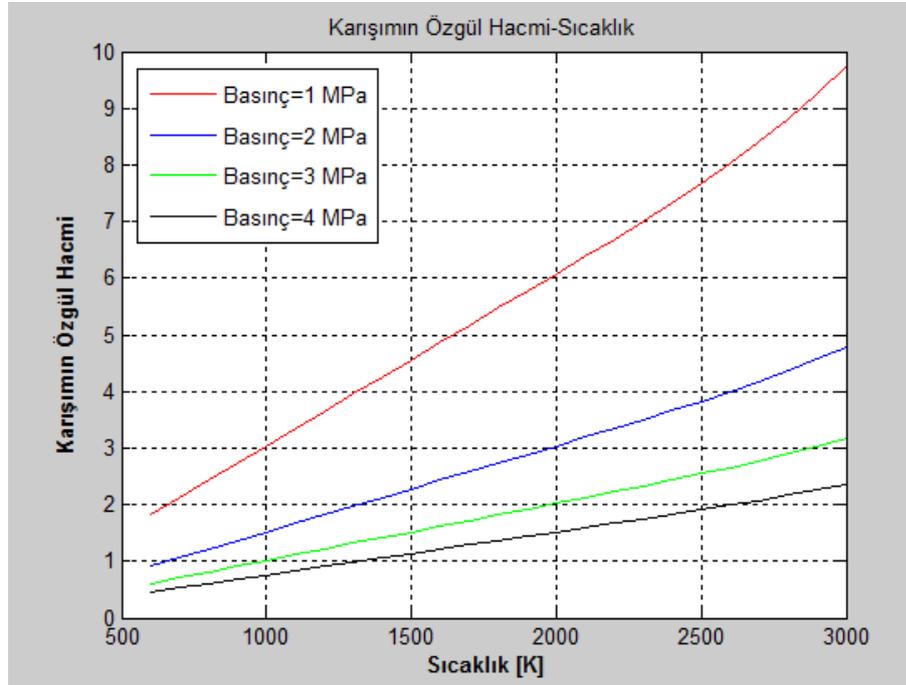
Şekil 4.3. Ara yüzde oluşturulan yanma ürünleri mol fraksiyonları



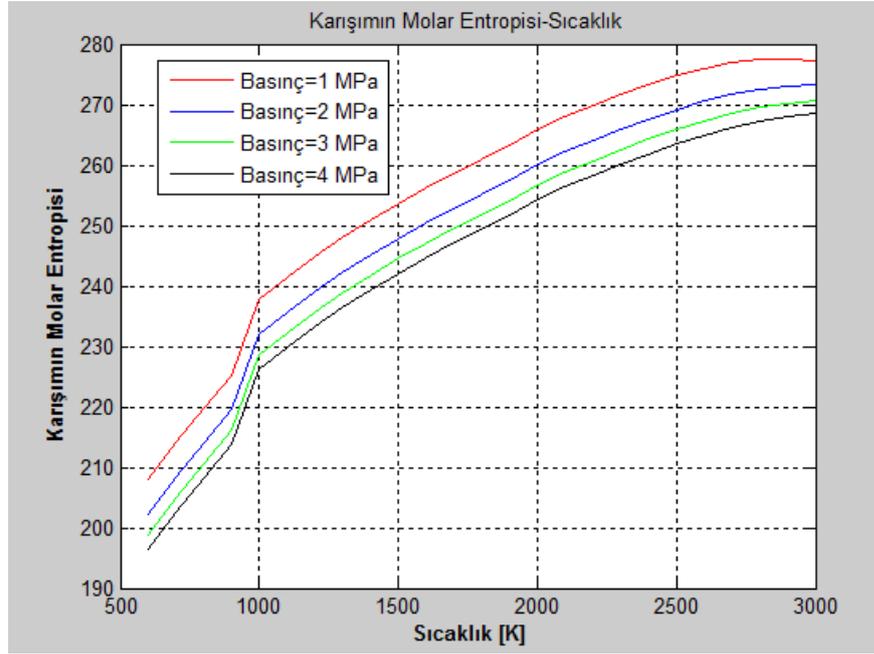
Şekil 4.4. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının molar entalpi grafiği



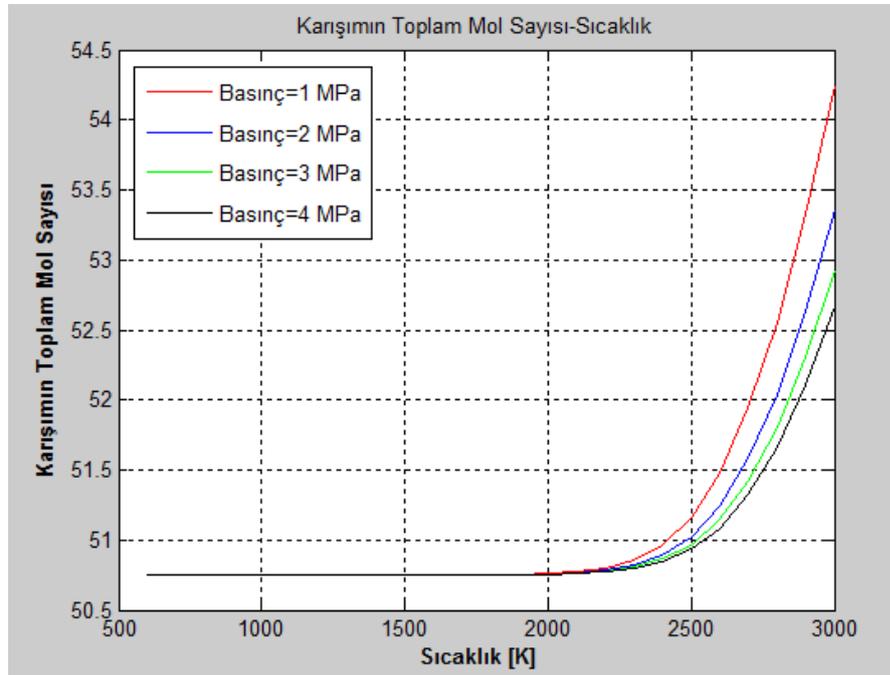
Şekil 4.5. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının kütleli iç enerji grafiği



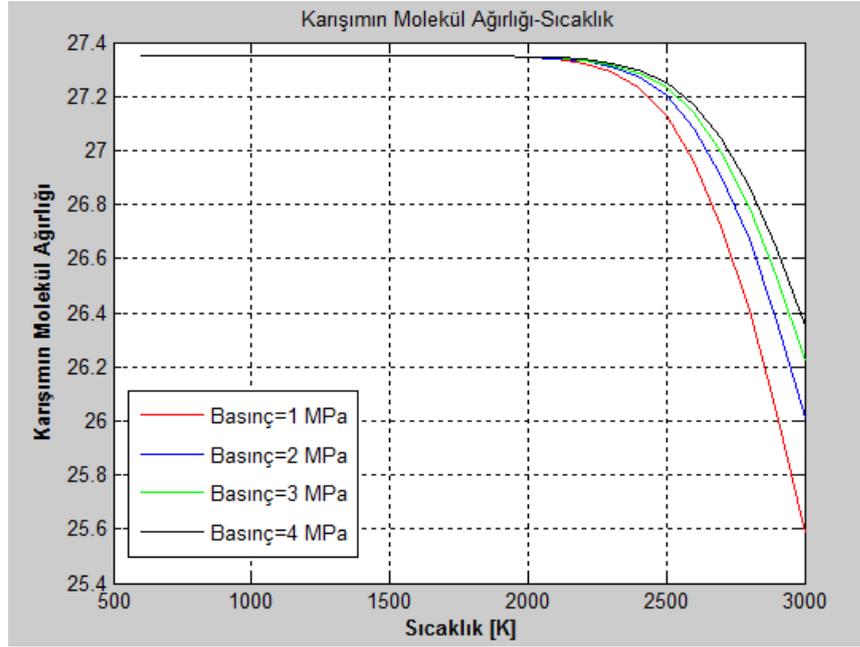
Şekil 4.6. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının özgül hacim grafiği



Şekil 4.7. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının molar entropi grafiği



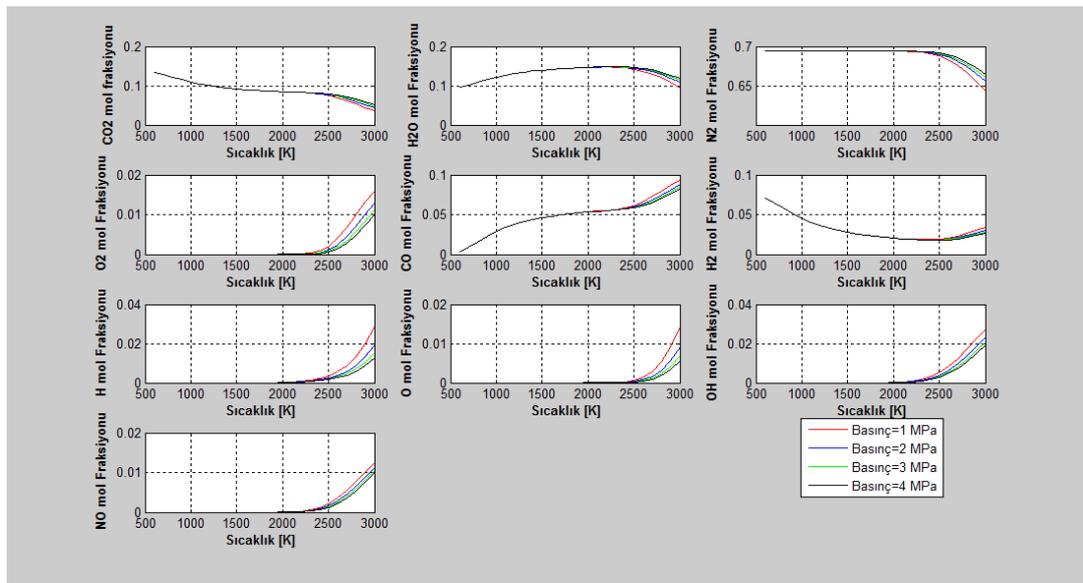
Şekil 4.8. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının toplam mol sayısı grafiği



Şekil 4.9. Ara yüzde oluşturulan yanma karışımının molekül ağırlığı grafiği

4.2. Programın Değişik Sıcaklık ve Basınç Aralığında Çalıştırılması ve Sonuçlar

Program, 1500 K, 2000 K ve 2500 K sıcaklık değerleri için çalıştırıldığında elde edilen sonuçlar ve grafikler incelenmiştir.



Şekil 4.10. 600 ile 3000 K arası sıcaklık değerlerine göre mol fraksiyonları

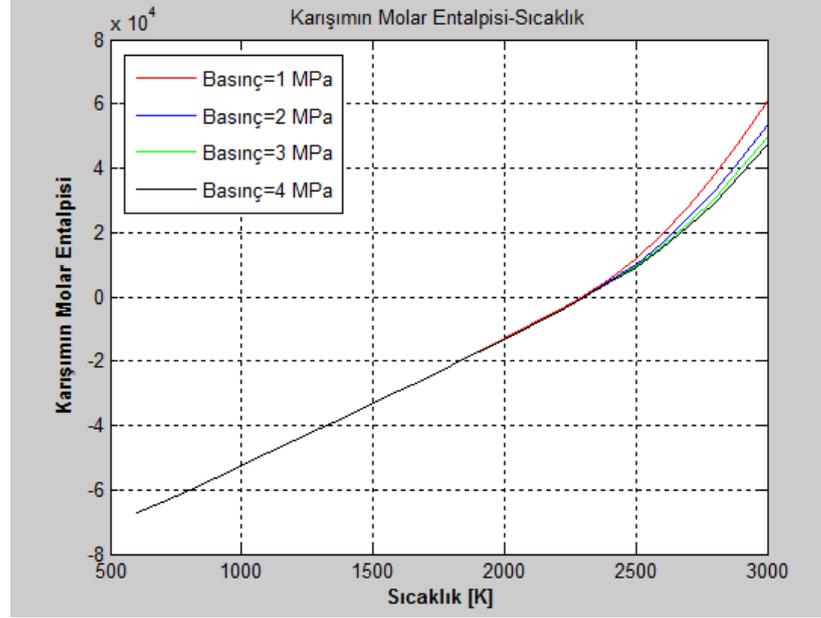
Şekil 4.10'da yanma ürünlerinin, 600 K ile 3000 K sıcaklık aralığında ve 1 MPa ve 4 MPa basınç aralığında mol fraksiyonlarının değişimi gösterilmiştir.

Karbon dioksit (CO_2), değerleri sıcaklık artışıyla azalmıştır. Karbon monoksit (CO) mol fraksiyonları da sıcaklık artışıyla artmıştır. Sabit bir yakıtın, düşük sıcaklıklarda yanması sırasında karbon dioksitin parçalanması çok zordur. Fakat artan sıcaklıkla karbon dioksit ısının katalizörlüğünde parçalanarak karbon monoksit (CO)'e ve oksijene (O_2)'e dönüşür. Şekil 4.10 incelenirse, sıcaklığın kırılma noktası 1700 K civarındadır. Suyun (H_2O), mol fraksiyonunun düşük sıcaklıklarda, düşük seviyelerde iken sıcaklığın artışı ile suyun mol fraksiyonu artmıştır. Sıcaklığın 2000 K'nin üzerinde olduğu durumlarda ise suyun mol fraksiyonunda azalmalar gözlenmiştir. Aynı zamanda OH, H ve O_2 türlerindeki değişim H_2O türüne zıt yönlü bir değişim göstermiştir. Dolayısıyla ısı katalizörlüğünde parçalanma reaksiyonu H_2O için de geçerli olduğu söylenir.

N_2 türünün mol fraksiyonu artan sıcaklıkla azalma göstermiştir. Bunun yanında azot monoksitin mol fraksiyonu (NO) 1500 K sıcaklıkta sıfır (0) iken, 2500 K sıcaklığa doğru çıkıldıktan artma göstermiştir. Buradan yüksek sıcaklıklara doğru çıkıldıkça NO_x oluşumlarının hızla arttığı söylenebilir. NO_x 'ler en önemli hava kirleticiler olduğu için yüksek sıcaklıklı yanma proseslerinde NO_x emisyonlarının fazla olduğu, dolayısıyla yüksek sıcaklıklı yanma prosesleri emisyon açısından istenmeyen bir durumdur.

O_2 ' nin mol fraksiyonu artan sıcaklıkla artmıştır. Isı katalizörlüğünde CO_2 , H_2O gibi türlerin parçalanması sonucu O_2 türünün mol fraksiyonu artmıştır. O_2 türünün artması, özellikle de yüksek sıcaklarda N_2 türüyle kimyasal tepkime verme ihtimalini arttırdığı için emisyona olumsuz etkide bulunur.

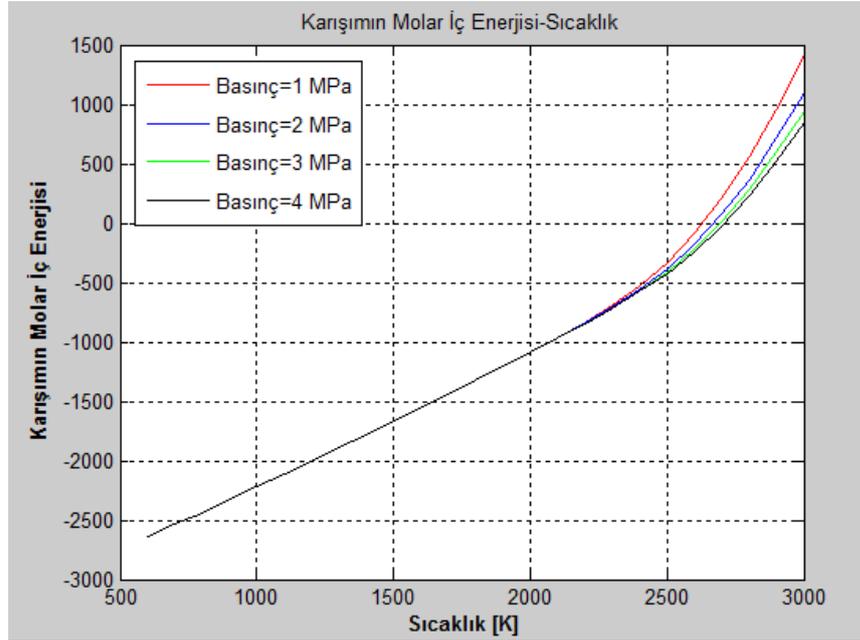
H_2 türünün mol fraksiyonu 1500 K dolaylarında yüksek iken, sıcaklık arttıkça mol fraksiyonunda azalma görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda denge kompozisyonu içerisinde serbest halde bulunan element ve/veya moleküller kararlı hale geçmek için tepkime vermek isterler ve böylece H_2 gibi serbest türler ile tepkimeler verirler. O yüzden H_2 gibi serbest türlerin miktarları sıcaklık arttıkça azalma eğilimindedir.



Şekil 4.11. 600 ile 3000 K arası sıcaklık değerlerine göre molar entalpi değişimi

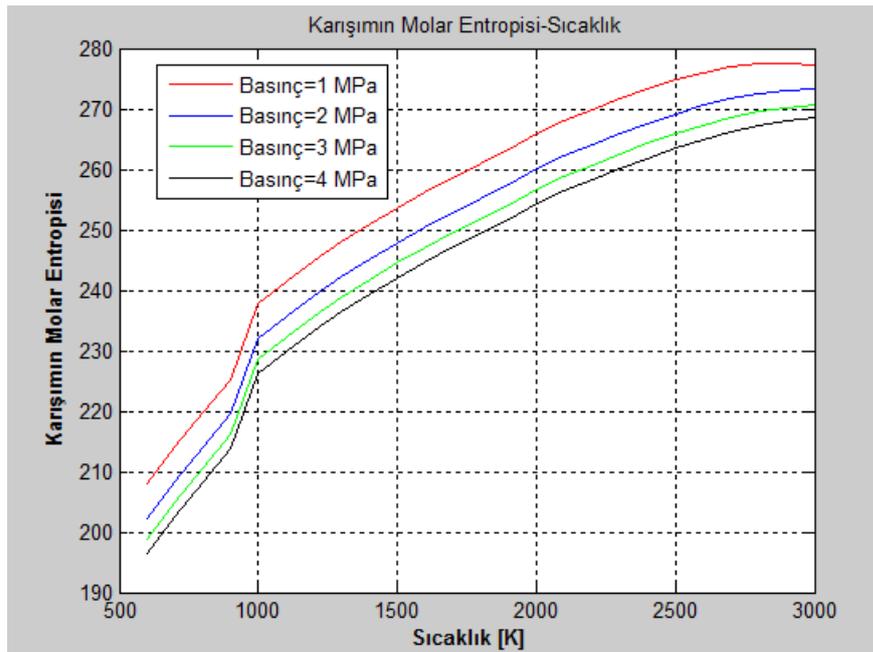
Şekil 4.10'da yanma ürünlerinin karışımına ait, 600 K ile 3000 K sıcaklık aralığında ve 1 MPa ve 4 MPa basınç entalpi değişimi gösterilmiştir. Entalpi değişimi, 2000 K kadar kimyasal parçalanmaların etkisi az olduğu için lineer bir artış göstermiştir. Fakat 2000 K'den sonra entalpi değişimindeki artış biraz daha artmıştır.

Entalpi değişimi basıncın etkisiyle de değişmiştir. Basınç artışıyla, reaksiyon sonucu elde edilen enerji miktarında azalma görülmüştür. Basıncın artışı kimyasal parçalanmalara sebebiyet verdiği için, yakıttan elde edilen enerjinin bir kısmı, bazı türlerin parçalanmasında ve/veya yeni türlerin oluşmasında kullanılmıştır.



Şekil 4.12. 600 ile 3000 K arası sıcaklık değerlerine göre molar iç enerji değişimi

Şekil 4.12’de 600 ile 3000 K’de ve 1 ile 4 MPa arasında yanma karışımının iç enerji değişimi verilmiştir. İç enerjideki değişim karakteri ile entalpideki değişim karakterine benzerdir.



Şekil 4.13. 600 ile 3000 K arası sıcaklık değerlerine göre molar entropi değişimi

Şekil 4.13'te 600 ile 3000 K sıcaklık aralığında ve 1 ile 4 MPa basınç aralığında entropi değişimi gösterilmiştir. Sıcaklığın artışı entropiyi artırır iken, basınç artışı entropiyi azaltmıştır.

Çizelge 4.1. Değişik sıcaklık değerlerine göre program çıktıları

Tür/Özellik	1500 K	2000 K	2500 K
CO₂ Mol Kesri	0.091687	0.084495	0.075146
H₂O Mol Kesri	0.13983	0.14676	0.14253
N₂ Mol Kesri	0.69457	0.6944	0.68791
O₂ Mol Kesri	0	4.2075e-006	0.0019377
CO Mol Kesri	0.046248	0.053409	0.061681
H₂ Mol Kesri	0.027661	0.020494	0.019235
H Mol Kesri	0	0.00023046	0.0034521
O Mol Kesri	0	1.3538e-006	0.00062918
OH Mol Kesri	0	0.00016408	0.0053133
NO Mol Kesri	0	3.4187e-005	0.002166
Molar Entalpi	-33166.7595	-13095.776	11706.498

Çizelge 4.1, 1500, 2000 ve 2500 K sıcaklıkları için programın çalıştırılması sonucu elde edilen veriler için oluşturulmuştur. Karbon dioksitin mol fraksiyonu sıcaklığın artışıyla azalmıştır. Karbon monoksitin mol fraksiyonu sıcaklığın artışı ile artmıştır. Diğer türler için de değerlendirme yapıldığında yüksek sıcaklıklarda termal parçalanmanın etkin olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Oluşturulan GUI ara yüz, çok kompleks bir konu olan yanma ve yanma ile ilgili modelleme hesaplamalarında kullanılmıştır. Kompleks olan yanma bu ara yüz sayesinde çok pratik bir hale gelerek, hem anlatım kolaylığı sağlamış hem de yanmayı etkileyen faktörlere bağlı olarak yanma türlerinin termokimyasal özelliklerinin değişimi incelenebilmiştir. GUI hesaplama kolaylığının yanında hesaplamalarda hata oluşmasına da müsaade etmemiştir. Dolayısıyla doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Yanma reaksiyonlarının nihai ürünlerinin kompozisyonlarının ve termodinamik özelliklerinin hesaplanması gerekir. Bu çalışmada, kimyasal dengenin sağlandığı hesaplama avantajlarından faydalanılarak, Denge Katsayıları Yöntemi kullanılarak yanma ürünlerinin kompozisyonlarının ve termodinamik özelliklerinin, belirli sıcaklık ve basınç aralığında değişimi hesaplanmıştır. Çalışma sonuçlarının yapılmış çalışmalarla uygunluğu test edilmiştir. İçten yanmalı motorlarda yanma stroğu ortalama 1 MPa ve 4 MPa basınçlar arasında gerçekleştiği için bu iki basınç altında çalışılmıştır.

Yanma tepkimelerinin nihai ürünleri genellikle, CO₂, H₂O, N₂ gibi türlerdir. Fakat yanma koşulları yanma sonu ürünlerini etkilemiştir. Örneğin, karışımın zengin veya fakir olması durumunda yanma sonu ürünleri değişmiştir.

Çalışmada n-heptanın zengin karışım ile yanması incelenmiştir.

Yanma tepkimelerinde, yüksek sıcaklıklarda, yanma ürünlerinde ısı katalizörlüğünde parçalanma meydana gelir. Dolayısıyla yanma sonu ürünleri; CO₂, H₂O, N₂ olması gerekirken parçalanma reaksiyonları ve N₂'in yüksek sıcaklıklardaki tepkime verme isteği sonucu, H, H₂, O₂, NO, CO, OH, O gibi türlerde meydana gelmektedir. Zengin karışım koşullarında çalışıldığı için, 2000 K'e kadar H₂O ve CO'nun mol fraksiyonları

artarken, CO₂, H₂ türlerinin mol fraksiyonlarında azalma meydana gelmiştir. 2000 K'nin üzerinde ısı katalizörlüğünde parçalanma reaksiyonları arttığı için CO₂, H₂O ve N₂ türlerinin mol fraksiyonlarda azalma meydana gelmiştir. Diğer türlerin 2000 K'nin üzerinde mol fraksiyonları da artmıştır.

2000 K'in üzerinde basıncın etkin olduğu ve basınç arttıkça CO₂, H₂O ve N₂ türlerinin mol fraksiyonlarının, diğer türlerin aksine, arttığı gözlenmiştir. 2500 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda, sıcaklık artışı ile CO₂, H₂O türlerinin mol kesirleri azalmaya devam etmiştir. Basınç, kimyasal dengede, denge katsayısını etkileyen bir parametre değildir. Fakat basıncın değişimi denge sabitinin, sabit kalabilmesi için dengenin ürünler tarafına kaymasına neden olmuştur. Bundan dolayı ana yanma ürünleri olan CO₂, H₂O ve N₂ türlerinin mol fraksiyonları artan basınç ile artarken, diğer türlerinin mol fraksiyonları artan basınç ile azalmıştır.

GUI bu anlamda özellikle lisans seviyesinde yanmanın anlatımı için farklı bir metot olarak kullanılabileceği kanısına varılmıştır.

5.2. Öneriler

Bu çalışma kapsamında GUI ara yüzünün lisans seviyesinde Yakıtlar ve Yanma, Yanma Mühendisliği, Termodinamik, Isı Transferi gibi yanma ile alakalı lisans derslerinde kullanılabilir.

Bu çalışmada yanmanın matematiksel olarak kimyasal dengeden faydalanılarak düşük ve yüksek sıcaklıklar için modellenmiştir. Kimyasal dengede CO₂, H₂O, N₂, H₂, CO, O, H, OH, O₂ ve NO türlerinin olduğu kabul edilmiştir. Hidrokarbon yakıtın bünyesinde, safsızlık maddeleri yoktur. Yakıtın bünyesinde azot, kükürt vs. safsızlık maddeleri de ilave edilerek bu çalışma genişletilebilir.

Yakıtın farklı yanma koşullarında, yanma sonu ürünler farklı olacağından, yanma esnasında oluşabilecek diğer kimyasal kompozisyonlar da ilave edilerek modelleme genişletilebilir.

GUI ara yüzünün .exe formatını Sayın Prof. Dr. M. Akif CEVİZ'den (aceviz@atauni.edu.tr) veya Emrah ESİN'den (emrahesin0101@gmail.com) alabilirsiniz.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2014. [http://hasankara91.blogspot.com.tr/2014/03/euro-emisyon standartlar.html](http://hasankara91.blogspot.com.tr/2014/03/euro-emisyon_standartlar.html). 13/08/2014
- Anonim, 2014. http://www.bayar.edu.tr/besergil/6_yakitlar.pdf. 17/08/2014
- Anonim, 2014. http://www.bayar.edu.tr/besergil/3_enerji_ve_entalpi.pdf. 28/08/2014
- Buttsworth, D.R., 2002. Spark Ignition Internal Combustion Engine Modelling Using Matlab, Faculty of Engineering & Surveying University of Southern Queensland Toowoomba Qld 4350 Australia.
- Can, Ö., 2014. Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture, *Energy Conversion and Management*, 87, 676-686.
- Ceviz, M.A., Yüksel, F., 2003. Yanma Ürünlerinin Bileşim ve Termokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi, *Termodinamik*, 136, (12), 98-102.
- Çanakçı, M., 2008. An experimental study for the effects of boost pressure on the performance and exhaust emissions of a DI-HCCI gasoline engine, *Fuel*, 87, 1503-1514.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2011. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Gözden Geçirilmiş 5. Baskı. İzmir Güven Kitapevi, 946 s, İZMİR.
- Çiftçi, S., 2011. MATLAB. Kodlab Yayın Dağıtım Yazılım ve Eğitim Hizmetleri San. Ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- Çoban, T., 2014. Kimyasal Denge (Gibbs Serbest Enerjisinin Minimizasyonu). Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, <http://turhancoban.com/makaleler/index.html>, 14/08/2014.
- El-Mahallawy, F., Habik, S., 2002. *Fundamentals and Technology of Combustion*. Elsevier Science Ltd. The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford, Ox5, 1GB, UK.
- Faravelli, T., Frassoldati, A., Ranzi, E., 2003. Kinetic modeling of the interactions between NO and hydrocarbons in the oxidation of hydrocarbons at low temperatures, *Combustion and Flame*, 132, 188-207.
- Ferguson, C.R., Kirkpatrick, A.T., 2001. *Internal Combustion Engines*. Wiley, 369, Amerika.
- Glassman, I., Yetter, R.A., 2008. *Combustion*, Fourth Edition, Typesent by Charon Tec. Ltd., A. Macmillan Company.
- Gümüş, M., 2009. Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of thermal energy storage system, *Appl. Therm. Eng.*, 29, 652-660.
- Heywood, J.B., 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Book Co., 930, Singapore.
- İğdırı, A.S., 2012. Motorlarda Silindir İçi Basınç Değişiminin Termodinamik Modellenerek Bir Grafik Kullanıcı Arayüz İle Sunumu. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Kavaklı, M., Özbay, İ., 2006. Yanma Olayının Çevre Ortamına Etkilerinin İncelenmesi. 9th International Combustion Symposium.

- Kayadelen, H.K., Ust, Y., 2013. Prediction of equilibrium products and thermodynamic properties in H₂O injected combustion for CaHbOcNd type fuels, *Fuel*, 113, 389-401.
- Maurya, R.K., Agarwal, A.K., 2014. Experimental investigations of performance, combustion and emission characteristics of ethanol and methanol fueled HCCI engine, *Fuel Processing Technology*, 126, 30-48.
- McBride, B.J., Gordon, S., Reno, M.A., 1993. Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species. NASA Technical Memorandum 4513.
- Pulkrabek, W.W., 2003. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey: Prentice Hall.
- Qi, K., Feng, L., Leng, X. Du, B. Long, W., 2011. Simulation of quasi-dimensional combustion model for predicting diesel engine performance, *Applied Mathematical Modelling*, 35, 930-940.
- Rakopoulos, C.D., Rakopoulos, D.C., Giakoumis, E.G., Kyritsis, D.C., 2004. Validation and sensitivity analysis of a two zone Diesel engine model for combustion and emissions prediction, *Energy Conversion and Management*, 45, 1471-1495.
- Ramachandran, S., 2009. Rapid Thermodynamic Simulation Model of an Internal Combustion Engine on Alternate Fuels. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. ,Vol II, March 18 - 20, 2009, Hong Kong.
- Soruşbay, C., 2014. İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Gazları Emisyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi Otomotiv Laboratuvarı, <http://web.itu.edu.tr/~sorusbay/EGE/EGE.htm>, 20/03/2014.
- Stull, D.R., Prophet, H., 1970. JANAF Thermochemical Tables, The Thermal Research Laboratory Dow Chemical Company Midland, Michigan.
- Truffin, K., Colin, O., 2011. Auto-ignition model based on tabulated detailed kinetics and presumed temperature PDF–Application to internal combustion engine controlled by thermal stratifications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4885-4894.
- Torkzadeh, D.D., Langst, W., Kiencke, U., 2001. Engine Modeling and Exhaust Gas Estimation for DI-Diesel Engines. Proceeding of the American Control Conference, 25-27 June 2001, Arlington, VA.
- Vujovic, V.V., 2011. Determining The Composition Of High Temperature Combustion Products Of Fossil Fuel Based On Variational Principles and Geometric Programming, *Thermal Science*, 1, (15), 125-134.

ÖZGEÇMİŞ

1989'da Adana'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Adana'daki farklı okullarda tamamladı. Lise öğrenimini Orhan Çobanoğlu Lisesi'nde tamamladı. 2007 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu ve yine aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. Aynı zamanda, 2009 yılında çift ana dal programından okumaya hak kazandığı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü'nden de 2012 yılında mezun oldu.

İlk mesleki tecrübesini Erzurum'da bir yapı denetim firmasında kontrol mühendisi olarak kazandı. Devamında asansör muayene uzmanlığı yaptı.

2012-2014 yılları arasında çalışmış olduğu bir gıda firması bünyesinde Trabzon'da Ortodoks Metodu ile siyah çay üretim fabrikasının kurulumunda proje müdürlüğü yaptı.

İngilizce bilmektedir.