

**DOĞAL GAZ YANMASINDA AZOTOKSİT
OLUŞUMU**

Suat ÖZTÜRÖ

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

ZONGULDAK

Ocak 2008

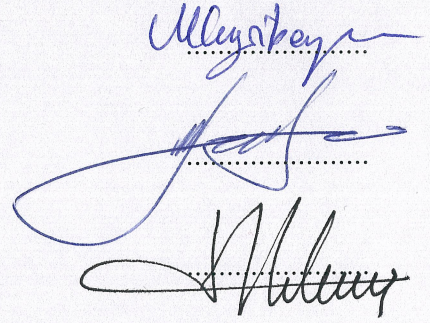
KABUL:

Suat ÖZTÜRK tarafından hazırlanan "DOĞAL GAZ YANMASINDA AZOTOKSİT OLUŞUMU" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle (~~veya oyçokluğuyla~~) kabul edilmiştir. 21/01/2008

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Mustafa EYRİBOYUN (ZKÜ)

Üye : Prof. Dr. Hasan Alpay HEPERKAN (YTÜ)

Üye : Prof. Dr. Mehmet KOPAÇ (ZKÜ)



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .../.../2008


Prof. Dr. Mustafa SÖZEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Suat ÖZTÜRK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞAL GAZ YANMASINDA AZOTOKSİT OLUŞUMU

Suat ÖZTÜRK

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa EYRİBOYUN

Ocak 2008, 57 sayfa

Yanma olaylarının sonunda yanma ürünü olarak ortaya çıkan azotoksitin (NO_x) oluşumu ve miktarı, metan (CH_4), Rusya-Shebelinka, İran-Güney Pars ve Tekirdağ Doğal Gazları'nın yanması için incelenmiştir.

Stokiyometrik şartlarda, ön karışımli yanma olayının sonucunda yanma ürünü olarak oluşan NO_x miktarının teorik olarak saptanması için, reaksiyon mekanizmasını oluşturan elementer reaksiyonlar ve bileşenlere ait termodinamik veriler literatürden bulunmuş ve hesaplamalar FORTRAN 77 koduyla yazılmış olan CREK adlı bir bilgisayar programında yapılmıştır.

Program koşullarında, kontrol hacmine taşınım ve difüzyonla birim zamanda giren, farklı toplam kütle miktarlarında ($\text{EMV}=0.01, 0.1, 1, 10, 100 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$) ve farklı reaktant giriş sıcaklıklarında ($T_g= 223 \text{ K}-323 \text{ K}$ aralığında), yakıt/hava eşdeğer oranı $\Phi=0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$ için yanma sonu ürünlerinden biri olan azot oksitlerin (NO_x) miktarları elde

ÖZET (devam ediyor)

edilmiştir. Sabit bir reaktant giriş sıcaklığı ve yakıt/hava oranı için EMV değerleri artırıldığında yanma sonu oluşan NO_x miktarlarının da arttığı; NO_x kütle oranlarının ise düşük EMV değerlerinde dikkate değer bir değişim göstermediği, yüksek EMV değerlerinde ise azaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte sabit bir EMV değeri ve yakıt/hava oranı için giriş sıcaklıkları artırıldığında, NO_x miktarlarında da artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Sabit bir reaktant giriş sıcaklığı ve yakıt/hava eşdeğer oranı için yakma havasındaki nem oranının yükselmesi yanma sonu NO_x miktarlarında azalmaya sebep olduğu saptanmış ve sonuçların literatürde verilenlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Doğal Gaz Yanması, NO_x Oluşumu, Azotoksit, Yanma

Bilim Kodu: 625.04.04.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

NITROGENOXIDE FORMATION IN NATURAL GAS COMBUSTION

Suat ÖZTÜRK

**Zonguldak Karaelmas University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr., Mustafa EYRİBOYUN

January 2008, 57 pages

Amount of nitrogen oxide (NO_x) which yields at the end of natural gas combustion and it's formation are investigated for combustion of methane (CH_4), Russia-Shebelinka, Iran-South Pars and Tekirdağ natural gases.

Under stociometric conditions, to find theorotically amount of NO_x at the end of a premixed combustion event, thermodynamic data of components and elementer reactions constituing reaction mechanism are taken from the related literature and CREK program created by Fortran 77 codes is used to make calculations.

By running the program, amounts of NO_x that is one of products yielding at the end of combustion are obtained for fuel/air equivalence ratio $\Phi=0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$ in different reactant inlet tempratures ($T_g=223\text{ K}-323\text{ K}$ interval) and different total mass amounts ($\text{EMV}=0.01, 0.1, 1, 10, 100\text{ kg}/(\text{m}^3.\text{s})$) entering to control volume via

ABSTRACT (continued)

convection and diffusion. When values of EMV are increased for a constant reactant inlet temperature and fuel/air ratio, it has been observed that amounts of NO_x have raised up and mass fractions of NO_x haven't considerably changed at low EMV values but have decreased at high EMV values. It has been observed that amounts of NO_x have increased when inlet temperatures are increased for a constant EMV and fuel/air ratio. For a constant reactant inlet temperature and fuel/air equivalence ratio, increased humidity ratio of burning air is caused amounts of NO_x to decrease at the end of combustion and the results have been found in harmony with the literature.

Key Words: Natural Gas Combustion, NO_x Formation, Nitrogenoxide, Combustion

Science Code: 625.04.04.

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım süresince yardımını esirgemeyen saygıdeğer hocam, tez danıőmanım Yrd. Doç. Dr. Mustafa EYRİBOYUN baőta olmak üzere, Enformatik Bölümü öğretim elemanlarından Öğr. Gör. Özgür ZEYDAN'a ve sevgili ablam Yrd. Doç. Dr. Feride ÖZTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Suat ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 YÖNTEM.....	1
1.2 KONU İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	3
1.2.1 NO _x Oluşumu Hakkında Yapılmış Olan Çalışmalar	3
1.2.2 Reaksiyon Mekanizması ve Termodinamik Verileri ile İlgili Yayınların Araştırılması.....	5
BÖLÜM 2 YANMA VE REAKSİYON MEKANİZMASI	7
2.1 TANIMLAR	7
2.2 TERMOKİMYASAL DENGE	8
2.3 KİNETİK HALDE YANMA (SONLU HIZ KİMYASI)	8
2.4 REAKSİYON MEKANİZMASI.....	10
BÖLÜM 3 AZOT OKSİTLER (NO _x).....	15
3.1 AZOT OKSİTLER VE ÖZELLİKLERİ	15

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2 AZOT OKSİTLERİN OLUŞUMU	16
3.2.1 Isıl (Termal) NO _x Oluşumu	16
3.2.2 Yakıt Kaynaklı (Fuel) NO _x Oluşumu	16
3.2.3 Ani (Prompt) NO _x Oluşumu	17
3.3 NO _x OLUŞUMUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER	17
3.3.1 Yakıt Kompozisyonu	17
3.3.2 Fazla Hava	17
3.3.3 Ön Isıtma Sıcaklığı	18
3.3.4 Ocak Sıcaklığı	18
3.4 NO _x KONTROL METODLARI	18
BÖLÜM 4 YANMA SONU EMİSYON DEĞERLERİ VE STANDARTLAR	19
4.1 DOĞAL GAZ YANMASI EMİSYONLARI	19
4.2 EMİSYONLARIN ZARARLI ETKİLERİ	22
4.3 NO _x HAVA KALİTE STANDARTLARI	23
4.4 TÜRKİYE'DE EGZOS EMİSYONU SINIR DEĞERLERİ	23
BÖLÜM 5 BİLGİSAYAR PROGRAMININ TANITIMI, KOŞULMASI VE SONUÇLAR	25
5.1 CREK'İN TANITILMASI	25
5.2 TERMOKİMYASAL VERİ DOSYASI	26
5.2.1 Element Verileri	26
5.2.2 Termodinamiksel Özellik Verileri	27
5.2.3 Kinetik Veriler	27
5.2.4 Reaktant Verileri	28
5.3 VERİ DOSYASININ OLUŞTURULMASI VE TAKİP EDİLEN YOL	28
5.4 METAN VE DOĞAL GAZIN KURU VE NEMLİ HAVA İLE STOKİOMETRİK YANMASINDA KATSAYILAR	30
5.5 ELDE EDİLEN SONUÇLAR	31
BÖLÜM 6 SONUÇLAR	39

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR.....	43
BİBLİYOGRAFYA	47
EK AÇIKLAMALAR A. ELEMENT VE TERMODİNAMİK DATALARI.....	49
EK AÇIKLAMALAR B. REAKTANT DATALARI	53
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
1.1	Teorik yanma modeli bileşenleri	2
4.1	Yakıtların yanmasından kaynaklanan CH ₄ , N ₂ O, NO _x , CO, NMVOC emisyonları .	21
4.2	Türkiye’de NO _x yüksek seviye emisyonları	21
4.3	Avrupa’da NO _x yüksek seviye emisyonları	22
5.1	Yakıt/Hava oranına göre NO _x kütle oranı.....	31
5.2	Eşitlik oranına göre maximum mole oranı	32
5.3	Türbin giriş sıcaklığı-NO _x arasındaki ilişki	33
5.4	Reaktant giriş sıcaklığı-NO _x arasındaki ilişki	33
5.5	EMV’ye göre NO _x kütle oranındaki değişim	34
5.6	Reaktant kütle miktarındaki değişime göre yanma sonu NO _x miktarı	35
5.7	Sıcaklığa göre NO _x kütle oranındaki değişim.....	35
5.8	Rusya doğal gazı için farklı EMV değerlerinde sıcaklığa göre NO _x kütle oranındaki değişim	36
5.9	Yakma havasının nem oranındaki değişimin yanma sonu NO _x miktarı üzerindeki etkisi ($\Phi = 1.0$, $T_g = 303$ K ve EMV=0.01 kg/(m ³ .s) için)	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Reaksiyon mekanizmasındaki reaksiyonlar, ileri hız katsayısı ifadesinin parametreleri	11
3.1	Azot oksitler.....	15
4.1	Birim enerji üretim için emisyon değerleri.....	19
4.2	Kuvvet santralleri emisyonları.....	20
4.3	Asya ülkeleri ve diğerlerinde hava kalite ve emisyon standartları.....	23
4.4	Gaz yakıt motorlu 0 km araçlarda emisyon standartları.....	23
4.5	Doğal gaz yakıtlı kazanlarda NO _x sınırlaması.....	24
5.1	Çalışmada kullanılan doğal gaz kompozisyonları.....	29
5.2	Bazı doğal gaz kompozisyonları.....	29
A.1	Reaksiyon mekanizmasında kullanılan element ve termodinamik dataları.....	50
B.1	Reaksiyon mekanizmasında kullanılan reaktant dataları.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:	yüzey alanı
A_p	:	kontrol hacmine taşınım ve difüzyonla, birim zamanda giren toplam kütle miktarı
C_p	:	sabit basınçta molar ısınma ısısı
C_v	:	sabit hacimde molar ısınma ısısı
E	:	aktivasyon enerjisi
EMV	:	yanma hücresine birim hacim başına birim zamanda giren kütle miktarı
h	:	entalpi
k	:	reaksiyon hızı
k_b, k_f	:	ileri ve geri reaksiyon hızları
m_{kh}	:	kuru havanın kütlesi
m_{sb}	:	su buharının kütlesi
M_{kh}	:	kuru havanın molekül ağırlığı
M_{sb}	:	su buharının molekül ağırlığı
n_{kh}	:	kuru havanın mol sayısı
n_{sb}	:	su buharının mol sayısı
NS	:	karışım içindeki bileşenlerin toplam sayısı
R_u	:	genel gaz sabiti ($R_u=8314.4 \text{ J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$)
T	:	sıcaklık
T_g	:	reaktant giriş sıcaklığı
V_i	:	kütlesel difüzyon hızı
w	:	nem oranı
W_i	:	herhangi bir i bileşeninin molekül ağırlığı
X_i	:	i bileşeninin mol oranı
$[X_i]$:	i bileşeninin konsantrasyonu
z	:	polinom uyum katsayıları
Φ	:	yakıt/hava eşdeğer oranı
Π	:	matematikte çarpım ifadesi
v', v''	:	sırasıyla, reaktantlara ve ürünlere ait stokiometrik mol sayıları

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

- CARB : California Air Resources Board (Kaliforniya Hava Kaynakları Kurulu)
- CHEMKIN: genel amaçlı, problemden bağımsız, taşınabilir, fortran kimyasal kinetikleri kod paketi (a general-purpose, problem-independent, transportable, fortran CHEMical KINetics code package)
- CREK : laminar ve türbülans akışta yanma reaksiyon dengesi ve kinetiğinin hesaplanması için bilgisayar programı (a computer program for calculation of Combustion Reaction Equilibrium and Kinetics in laminar or turbulent flow)
- EMV : CREK’te kontrol hacmine konveksiyon ve difüzyon yoluyla giren toplam madde tiktarı
- EPA : Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
- ER : CREK’te yakıt/hava eşdeğer oranı (equivalence ratio)
- ESP : elektro-statik çöktürme (electrostatic precipitation)
- FARMA : bulanık mantık otogerileyici hareketli ortalama (fuzzy auto-regressive moving average)
- FBC : akışkan yatakta yanma (fluidised bed combustion)
- IGCC : entegre gazlaştırma bileşik çevrimi (Integrated Gasification Combined Cycle)
- ITU : İstanbul Teknik Üniversitesi
- JANAF : Joint of Army Navy Air Forces (Ordu Deniz Hava Kuvvetleri Birliği)
- LNG : sıvılaştırılmış doğal gaz (liquified natural gas)
- NMVOC : metan içermeyen uçucu organik bileşikler (non-methane volatile organic compounds)
- NO_x : azot oksitler (nitrogen oxides)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

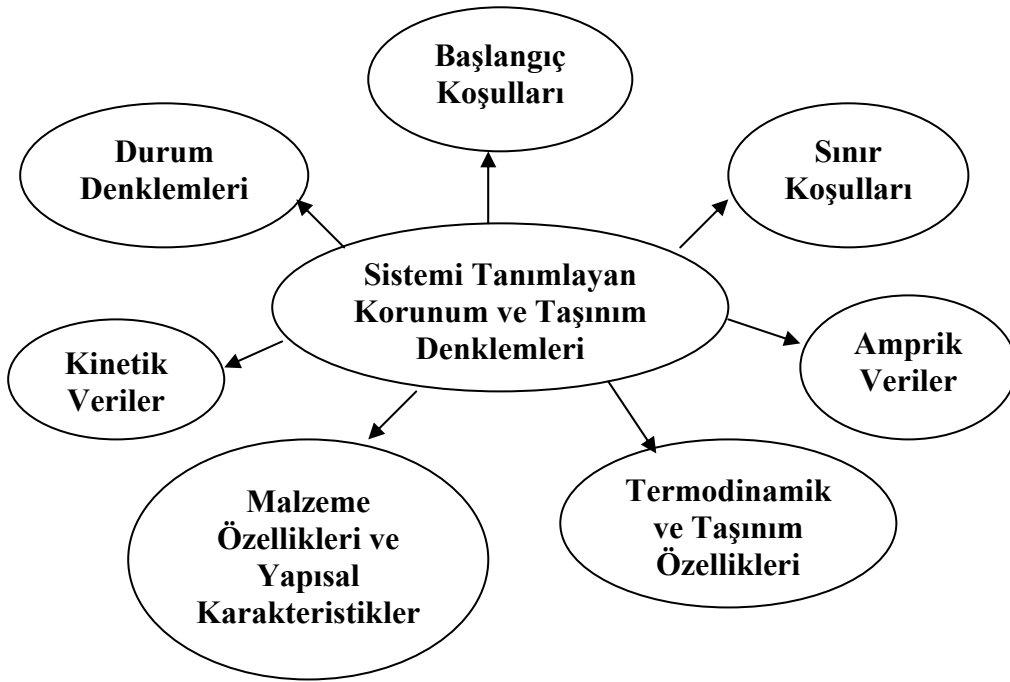
Ülkemizin her yıl artmakta olan enerji ihtiyacının büyük bir bölümü dışardan ithal edilerek karşılanmaktadır. 2005 yılı enerji ihtiyacının yüzde 38'ni petrol, yüzde 23'ünü doğal gaz, yüzde 27'sini kömür, yüzde 4.5'ünü hidrolik enerji ve kalan yüzde 7.5'nu da yenilenebilir ve ticari olmayan kaynaklar tarafından karşılandığı tespit edilmiştir (İTÜ 2007). Doğal gaz konutlarda, ticari işletmelerde, endüstriyel tesislerde ve ulaşımda kullanılmakta olup kömür ve petrol ürünlerine oranla daha az kirlilik oluşturduğu için artan oranda tercih edilmektedir. Çıkarıldığı bölgeye bağlı olarak doğal gaz, metan (%85-95), etan (%3-13), propan (%1-3), karbondioksit (%0-4), nitrojen (%0.1-3), ve diğer bileşenlerden (bütan, pentan, hexan ve su) (%1) oluşmaktadır (El-Sherif 1998). Endüstriyel amaçlı kullanım için saflaştırılmış doğal gazda ise metan oranı %99'a, bazı özel durumlarda da %100'e yaklaşmaktadır. Özellikle büyük kentlerde hava kirliliğinin önlenmesi için ısınma amaçlı olarak kullanılan doğal gaz, olumsuz yanma koşulları nedeniyle yanma ürünü olarak, azotoksitler (NO_x), karbonmonoksit (CO), kükürtoksitler (SO_x) gibi kirleticilerin oluşmasına sebebiyet vermekte, insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu çalışmada, yakıt olarak metan, Rusya-Shebelinka, İran-Güney Pars ve Tekirdağ doğal gazlarının kullanılması halinde farklı yanma koşullarında (EMV , Φ , T_g ve nem oranlarındaki değişimlere göre) oluşabilecek NO_x miktarlarındaki değişimlerin belirlenmesi üzerinde durulacaktır.

1.1 YÖNTEM

Yanma olayı, hem teorik hem deneysel metodlarla incelenebilir. Deneysel metodla yanmayı inceleme, yanma odasında tepkimelerin meydana geldiği alanın milimetre mertebesinde oluşu, tepkimeler esnasında sıcaklığın yüksekliği, tepkimelerin yüksek hızları v.b. gibi nedenlerden dolayı oldukça zordur. Teorik metodlarda, yanma esnasında meydana geldiği düşünülen reaksiyonları içeren bir reaksiyon mekanizması oluşturulur. Reaksiyonlara ve reaksiyonlardaki bileşenlere ait kinetik ve termokimyasal veriler literatürden bulunur ve

problemi çözmek için sistemin matematiksel modellemesine başlanılır. Diferansiyel bir yaklaşım olan matematiksel modelleme, dikkate alınan basınç, sıcaklık v.b. gibi fiziksel büyüklüklerin çözüm alanı boyunca değişimlerini göz önünde bulundurur (Çelik 1992, Eyriboyn'dan 1997). Şekil 1.1'de yanma olayına teorik yaklaşım için kullanılan modelin bileşenleri verilmiştir.

Bir yanma olayını tanımlayan reaksiyon mekanizmasındaki reaksiyonların tümü aynı anda başlayıp bitmez. Burada kastedilen, arka arkaya meydana gelerek birbirini takip eden başka bir deyişle basamak basamak gerçekleşen reaksiyonlar sinsilesidir. Basamak basamak cereyan eden bir tepkimede, ara reaksiyonların sonucunda oluşan ürünler bir sonraki reaksiyonda reaktant olarak kullanılırlar.



Şekil 1.1 Teorik yanma modeli bileşenleri (Kuo 1986, Eyriboyn'dan 1997).

Kinetik modelleme ile bilgisayarlar kullanılarak yanma işlemlerinin gerçeğe yakın bilgisayar simülasyonları yapılabilmekte ve teorik olarak yanma olayı incelenebilmektedir. Simülasyonlarda, çözüm alanı ızgara şeklinde küçük alanlara bölündükten sonra bu ızgaradaki her bir düğüm noktası için, problemi tanımlayan diferansiyel denklemler sonlu fark denklemleri halinde yazılarak cebrik denklemler elde edilmiş olunur. Cebrik denklemler, başlangıç ve sınır koşulları bilindiği için iteratif ya da matris yöntemleri kullanılarak, çözüm alanı boyunca sıcaklık, konsantrasyon v.b. gibi büyüklükleri hesaplamak için kullanılır. Yanma olayının cereyan ettiği bölge sistem olarak kabul edildiği zaman, reaktantların sisteme

giriş şartları bilinmesine rağmen sistem çıkışındaki değerlerin (yanma sonu ürünler) bilinmesi zor olduğundan, çıkışta kimyasal dönüşümlerin tamamen durduğu kabul edilir (Eyriboyun 1997).

Bu çalışmada, metan, Rusya-Shebelinka, İran-Güney Pars ve Tekirdağ doğal gazlarının yanması, denge şartlarında ve kısmi denge (kinetik) şartlarda incelenmiştir. Kimyasal bileşenlerin termodinamik verileri, katsayılar ve sabitler Göğüş (1990), Eyriboyun (1997), URL-1 (2000) ve URL-8 (1997), reaksiyon mekanizması ve diğer veriler ise El-Sherif (1998) çalışmasından alınmıştır. Bileşenlerin konsantrasyonları Fortran 77 bilgisayar programlama dilinde yazılmış, CREK adlı bir bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır.

1.2 KONU İLE İLGİLİ DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Çalışma konusu için yapılan yayın araştırması iki ana başlık altında toplanabilir: Birinci olarak, yanma sonunda azot oksitlerin oluşumu ile ilgili yayınların taranması, ikincisi; reaksiyon mekanizmaları ve termodinamik veriler ile ilgili yayınların araştırılması. Her iki başlığı içeren çalışmaları da literatür içerisinde bulmak mümkündür.

1.2.1 NO_x Oluşumu Hakkında Yapılmış Olan Çalışmalar

Bu konu hakkında yapılan çalışmalara bakıldığı zaman, diğer yakıtlara göre az da olsa, doğal gazların yakılması sonucu üretilen kirliliğin, hava azotundan kaynaklanan NO_x kirliliği olduğu görülür. Gaz alevinin sıcaklığı, alevde ışınlama ısı geçişi olmadığından dolayı yüksek. Bu sıcaklıkta $O_2 + N_2 \rightarrow 2NO$ reaksiyonu meydana gelmekte yani alev uçlarında NO gazı oluşmaktadır. Doğal gazın kendine özgü NO kirliliğini önlemek amacıyla, brülörün ucunda alevin dağıtılmasına çalışılır ya da yanma havası primer hava, sekonder hava, tersiyer hava olarak üç kademe verilererek; yanma bütün yanma odasının içine dağıtılır. Böylece sıcaklığın bazı noktalarda 1300 °C'yi geçmesi önlenir (Kadırgan 1991). El-Sherif (1998) laminar, ön karışımli alev şartlarında, farklı içeriklere sahip doğal gazların yakılması sonucu NO_x emisyonlarını hem deneysel hem de bir reaksiyon mekanizması ile teorik olarak incelemiş, hava-yakıt oranı $\Phi=1$ olduğu zaman NO_x emisyonlarının maksimize olduğu sonucuna varmıştır.

Yanma ortamında azot oksitlerin oluşum mekanizması 3 grupta toplanabilir (Miller and Bowman 1989, Özdemir 2000). Bunlar termal NO_x oluşumu, yakıt kaynaklı NO_x oluşumu ve ani NO_x oluşumudur. Termal NO_x oluşumu, yanma havasında bulunan oksijen atomlarıyla moleküler azotun yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girmesiyle azotoksitlere dönüşümüdür. Termal NO_x oluşumu Zeldovich tarafından $N_2 + O \leftrightarrow NO + N$, $N + O_2 \leftrightarrow NO + O$, $N + OH \leftrightarrow NO + H$ reaksiyonlarıyla tanımlanmıştır. Yakıt kaynaklı NO_x oluşumu, yakıt içerisindeki azot bileşiklerinin oksidasyonu sonucu azotmonoksit oluşmasıdır. Yakıttaki azotlu organik bileşiklerin miktarının artmasıyla yakıt kaynaklı azotmonoksit oluşumu da artmaktadır. Ani NO_x oluşumu, serbest karbon ve hidrokarbon radikalleriyle yakma havasındaki moleküler azotun tepkimeye girmesi sonucu oluşmaktadır.

Yanma sonucu oluşan kirlilik ve miktarı, yakılan yakıtın miktarına ve türüne, yakıt ve yakma sistemi özelliklerine, sistemin işletme biçimine ve meteorolojik koşullara bağlıdır (Yolcu 1997). NO_x emisyonunun %90-95'i yakma sistemlerinden kaynaklandığı görülmektedir. Normal şartlarda ve ortamda yeteri kadar oksijenin bulunması durumunda yakıtların yakılması sonucu yanma ürünü olarak CO₂, H₂O, kükürt, azot ve diğer elementlerin oksitleri oluşur (İlbaş ve Yılmaz 2002). Uygulamada, oksijenin bir kısmı yanma odasında yakıtla reaksiyona girmeden baca gazıyla dışarı çıktığı için, stokiometrik hava ile tam yanma gerçekleşmez. Bu nedenle yanma odasına stokiometrik havadan daha fazla hava verilir. Bu da baca gazında azot oksitlerin artmasına neden olur. Azot oksitlerden azotmonoksitin yanma sonunda daha fazla meydana geldiği belirlenmiştir (EPA 1999). Waibel (1997) yakıt kompozisyonu, fazla hava, önısıtma sıcaklığı ve ocak sıcaklığının azot oksit miktarını etkileyen en önemli faktörlerden olduğunu ve önısıtma sıcaklığının artmasıyla yanma sonu azotoksit salınımının arttığını belirtmiştir. Zevenhoven and Kilpinen (2004) yaptıkları çalışmada, doğal gazla çalışan türbinde, yanma sonu azotoksit konsantrasyonunun, türbin giriş sıcaklığındaki artışla birlikte arttığını bildirmişlerdir.

Turbiez et al. (2003) stokiometrik önkarişimli metan, metan/ethane, metan/etan/propan ve doğal gaz alevlerinin deneysel bir çalışmasını yaparak H, O, HCO, OH'ın mol oranlarını karşılaştırmış ve metan/etan/propan ve doğal gaz yanmalarında benzer karakteristikler sergilendiğini rapor etmiştir. Hırkaloğlu (2005) metan, hidrojen ve propan yanması için modellediği iki farklı geometriye sahip yanma odalarından, akış alanı ve sıcaklık dağılımlarına göre ikinci modelin daha verimli olduğu ve NO_x emisyon dağılımının sıcaklık

dağılımına benzerlik gösterdiğini belirlemiştir. NO_x , ozon tabakasının zayıflamasına, asit yağmurlarına, fotokimyasal sis oluşumuna ve solunması durumunda akciğer zarında tahribata neden olur (Mendioroz et al. 2006).

1.2.2 Reaksiyon Mekanizması ve Termodinamik Veriler ile İlgili Yayınların Araştırılması

Literatürde doğal gaz ve metan yanmalarına ait çok sayıda kinetik veri bulmak mümkündür. Özellikle basınç, sıcaklık, enerji ve bunlara ait birimlerin çalışmalarda farklılık gösterdiği göz önüne alınarak bu verilerin kullanılmasında dikkatli olmak gerekmektedir. Kinetik veriler; şok tüpü, tek boyutlu reaktör ve mükemmel karışimli reaktörler gibi sistemlerde yapılan deneylerle elde edilebilirler. Gaz yakıtlara ait reaksiyon adımları ve bunlara ait kinetik veriler Göğüş (1990), Westbrook and Dryer (1984) ve Miller and Bowman (1989)'nın çalışmalarından ve URL-1 (2000) ve URL-8 (1997) adreslerinden ayrıntılı olarak bulunabilmektedir.

Resuloğlu (1997) yakıt bileşimi ve yakma sistemi özelliklerine bağlı olarak yanma sonunda oluşan NO_x 'lerin oluşum mekanizmalarını incelemiş ve bir modelleme yapmıştır. El-Sherif (1998) 59 adımlı bir reaksiyon mekanizması kullanarak, farklı bölgelerden çıkartılmış doğal gazların yakılması sonucu oluşan NO ve NO_2 emisyonlarını karşılaştırmış ve en az NO_x salınımının CARB standartındaki doğal gazın yanması sonucu oluştuğunu göstermiştir. Cannon et al. (1998) ön karışimli metan yanmasında CO ve NO oluşumunun modellemesini yapmış ve 276 adımlı bir mekanizma kullanmıştır. Thomsen et al. (1999) yüksek basınçta metan alevini iki farklı kimyasal mekanizma kullanarak incelemiş ve Gri_mech mekanizmasının Glarborg tarafından ortaya atılan ve Drake ve Blint tarafından modifiye edilen GMK-DM mekanizmasından daha iyi sonuç verdiğini fakat zengin karışımlarda NO miktarının saptanmasında uygun olmadığını bulmuştur. Li and Williams (1999) iki evreli metan yanmasında NO_x oluşumunu incelemek için 177 adımlı bir reaksiyon mekanizması kullanmış ve NO_x emisyonunun alev yapısına, yakıt/hava eşdeğer oranına ve hava akımı içine eklenmiş su buharı ve CO_2 kütlesine bağlı olduğunu ve CH radikallerinin üretildiği bölgeye su buharını taşıma ile NO_x 'in azaltılabileceğini sonuçlamıştır. Havlucu (2003) metanol damlasının yanması ile ilgili yaptığı çalışmada 84 elementer reaksiyon ve 26 bileşen içeren bir kimyasal kinetik mekanizma kullanarak, yanma hızının sıcaklık dağılımı ve damla yüzey konsantrasyonunu üzerine etkisini ve hangi reaksiyonların en yüksek alev sıcaklığını etkilediğini farklı basınç ve sıcaklıklarda incelemiştir.

BÖLÜM 2

YANMA VE REAKSİYON MEKANİZMASI

Günümüzde ısıtma, taşıma, enerji üretimi v.b. gibi amaçlar için kullanılan sistemlerin büyük bir bölümünün çalışabilmesi, bir yakıtın yakılmasıyla elde edilen ısı enerjisinden sağlanmaktadır. Bu nedenle yanma, bilim dünyası için incelenmesi gereken önemli konulardan biri olmuştur.

2.1 TANIMLAR

Kimyasal bir reaksiyon olan yanma, maddenin ısı ve ışık yayarak oksijenle tepkimeye girmesi olarak tanımlanır. Yanma olayında tepkimeye giren maddeye yakıt, oksijen veya havaya yakıcı denir. Yakıt ve yakıcı birlikte reaktant olarak isimlendirilir. Yanma sonunda meydana gelen karbondioksit (CO_2), su buharı (H_2O), karbonmonoksit (CO), azotoksitler (NO_x), kükürtoksitler (SO_x), is ve diğer partiküller ürün olarak adlandırılırlar. Yakma sistemleri, yakıtın cinsi, yakıt/hava oranı, reaktantların yanma odasında kalma süreleri v.b. gibi etmenler ürün kompozisyonunu etkileyen faktörler arasında sayılır. Yanma esnasında meydana geldiği düşünülen reaksiyonların tümü reaksiyon mekanizmasını oluşturur.

Yanma esnasında reaksiyonlar çok hızlı olur ve şok dalgalarıyla yayılırsa patlama, iletimle iletilir ve yavaş olursa kontrollü yanma meydana gelir. Yakıt ve oksijen (yakma havası) reaksiyon esnasında aynı fazdaysa homojen, farklı fazlarda ise heterojen yanma olur. Yakıt havayla yakılırsa alev daha büyük, daha soğuk ve yaygın; oksijenle yakılırsa, azotun olmaması nedeniyle yanma ısısı, çok daha az yanma ürünü arasında paylaştırıldığından, alev daha sıcak, küçük, hızlı ve yoğun olur. Eğer yakıt ve hava önceden karıştırılıp sonra yakılıyorsa oluşan aleve ön karışımli alev, yakıt tek başına gelir ve yanma yakıtla havanın bulunduğu alanda gerçekleşirse oluşan aleve difüzyon alevi denir. Ön karışımli alev sıcak, belli sınırlarda, mavi renkli olur. Bir alev laminar ya da türbülanslı olabilir. Laminar olursa, alevin sınırı belli, sıcak ve soğuk bölgeleri kesin sınırlarla ayrılmış ve küçük olur; türbülanslı

olursa, alevler dağınık ve alevin farklı noktalarında bileşim ve sıcaklık kaymaları farklı olur (Kadırgan 1991).

2.2 TERMOKİMYASAL DENGİ

Yanma olayı teorik olarak termokimyasal denge kabulü ile çözüm veya kinetik çözümle analiz edilebilir. Denge kabulünde, ya her bir yakıt molekülünün oksijenle buluşarak tepkimeye girmesi için sonsuz sürenin olduğu ya da tepkime hızlarının sonsuz olduğu başka bir deyişle yanmanın sonsuz küçük bir zaman aralığında meydana geldiği kabulü vardır. Yakıt olarak hidrokarbonların kullanıldığı ve yakıtın tamamıyla yandığı (stokiyometrik, tam yanma, teorik yanma) bu kabulde, yanma sonu oluşan ürünler CO₂ ve H₂O'dur. Denge kabulü ile yapılan çözümler uygulamada hidrojen-oksijen yanması gibi çok hızlı cereyan eden yanma olayları için geçerli olabilmektedir. Ayrıca, denge kabulü, kinetik çözümlemedeki iteratif çözümler için gerekli başlangıç değerlerinin hesaplanmasında da kullanılır (Eyriboyun 1997).

Denge çözümlerinde, yanma sonrası oluşan ürünlerin miktarlarının hesaplanmasında statik ve dinamik denge yaklaşımları kullanılır. Statik denge yaklaşımları, belirli bir sıcaklık ve basınçtaki karışım için Gibbs fonksiyonunun minimize edilmesi prensibine dayanırken, dinamik denge yaklaşımı sonsuz reaksiyon süresinde, sonlu hız kinetiklerinin sınırlayıcı özelliğinden dolayı uygulamada pek tercih edilmez (Eyriboyun 1997). Bu çalışmada, denge çözümü için Pratt and Wormeck (1976) tarafından verilen CREK adlı bilgisayar programı kullanılmıştır.

2.3 KİNETİK HALDE YANMA (SONLU HIZ KİMYASI)

Yanma esnasında gerçekleştiği düşünülen reaksiyonlar farklı hızlarda meydana gelirken, bir birini takip eden reaksiyonlarda, bir önceki reaksiyonda ürün olarak ortaya çıkan bir bileşen takip eden bir başka reaksiyonda reaktant olarak tepkimeye girebilir ve başka bir bileşenin oluşmasına neden olabilir. Yanma olayı denge kabulü ile çözülmek istendiğinde sistemin reaktivitesi dikkate alınmadığından dolayı tüm yanmanın hangi hızla gerçekleştiği bilinemez. Uygulamada, tüm yakıt moleküllerinin yanma odasında oksijenle buluşarak reaksiyona girebileceği kadar yeterli süre olmaması nedeniyle denge kabulü ile yanma olayını ele almak

mümkün olmadığından, reaksiyon mekanizması ile birlikte zamana bağlı değişimleri de veren reaksiyon kinetiği büyük önem taşımaktadır.

Kimyasal kinetikte, kimyasal reaksiyonların oluşabilmesi için molekül ya da atomların birbirleriyle çarpışması (çarpışma teorisi) gerekir. Çarpışma esnasında atomlar ve elektronlar yeniden düzenlenir ve kimyasal bağlarla başka türlerin oluşumu sağlanır. Bu çarpışmalarda, reaksiyonu gerçekleştirmek için gereken enerjiye aktifleşme enerjisi denir.

Genel bir kimyasal reaksiyon ifadesi;



Burada ν' ve ν'' reaktantların ve ürünlerin stokiometrik mol sayılarını, W_i herhangi bir i bileşenin molekül ağırlığını ve NS bileşen sayısıdır. Bu genel denklemde, ileri reaksiyon hızı,

$$\frac{d[X_i]}{dt} = (\nu''_i - \nu'_i) k_f \prod_i [X_i]^{\nu'_i} \quad (2.2)$$

Geri reaksiyon hızı ise,

$$\frac{d[X_i]}{dt} = -(\nu''_i - \nu'_i) k_b \prod_i [X_i]^{\nu''_i} \quad (2.3)$$

olup, genelleştirilmiş net hız ifadesi ise,

$$\frac{d[X_i]}{dt} = (\nu''_i - \nu'_i) \left\{ k_f \prod_i [X_i]^{\nu'_i} - k_b \prod_i [X_i]^{\nu''_i} \right\} \quad (2.4)$$

olarak yazılabilir. $[X_i]$ i bileşenin konsantrasyonu, k_f ve k_b ileri ve geri kimyasal hız sabitleridir ve genellikle deneysel olarak ölçülürler. Hız sabiti için ampirik sonuçlar aşağıda verilen ve Arrhenius eşitliği olarak tanımlanan ifadeye uyacak şekilde korelasyona tabi tutulur,

$$k = AT^n \exp\left(\frac{E_a}{R_u T}\right) \quad (2.5)$$

Burada, A ve n birer katsayı, E_a aktivasyon enerjisi, T sıcaklığı ve R_u da evrensel gaz sabitidir. Sonlu-hız kimyasına ait reaksiyon denklemleri ve bunlara ait hız katsayıları deneysel olarak belirlenmekte ve literatürde bulunabilmektedir.

2.4 REAKSİYON MEKANİZMASI

Literatürde mevcut çalışmalar incelendiğinde, yanma olayı tam olarak çözülemediği için, gerçek bir yanma olayında meydana gelen reaksiyonları tümüyle bilmenin ve herhangi bir yakıt için, her çeşit alev tipine uyan genel bir reaksiyon mekanizması bulmanın, şu anki bilgilerimizle mümkün olmadığı görülmektedir. Bunda dolayı, çalışmalarda herhangi bir yakıtın, belli şartlarda, yanma işlemlerinin analizi için kullanılan reaksiyon mekanizmalarındaki reaksiyonlar, bileşenler ve sayılarının farklı olduğu görülmektedir.

Yanma sonunda azotoksitlerin oluşumu incelenmek istendiğinden, azotmonoksit ve azotdioksite ait elementer reaksiyonların, kullanılacak olan reaksiyon mekanizmasında bulunması gerekmektedir. Birçok reaksiyon mekanizması literatürde bulunmakla beraber, CREK'in elementer reaksiyon tiplerine getirmiş olduğu sınırlamalar göz önünde bulundurularak, en uygun reaksiyon mekanizması seçilmeye çalışılmıştır. Çalışmamızda kullanılan reaksiyon mekanizması Çizelge 2.1'de sunulmuş olup 26 bileşen ve 59 elementer reaksiyon içermektedir.

Çizelge 2.1 Reaksiyon mekanizmasındaki reaksiyonlar, ileri hız katsayısı ifadesinin parametreleri. Hız katsayıları $k=AT^B \exp(-C/T)$ olarak ifade edilir. (El-Sherif 1998).

Reaksiyonlar	$\log A$	B	$C(K)$
$\text{OH} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	9.041	1.300	1825.0
$\text{H} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{OH} + \text{O}$	14.255	0.000	8450.0
$\text{O} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{OH} + \text{H}$	5.255	2.500	3300.0
$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{H O}_2 + \text{M}$	20.574	-1.72	0.0
$\text{H} + \text{H O}_2 \leftrightarrow \text{OH} + \text{OH}$	14.342	0.000	710.0
$\text{H} + \text{H O}_2 \leftrightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	12.698	0.000	710.0
$\text{H} + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$	13.334	0.000	280.0
$\text{OH} + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	13.255	0.000	0.0
$\text{O} + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	13.301	0.000	0.0
$\text{H} + \text{H} + \text{M} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{M}$	18.000	-1.00	0.0
$\text{H} + \text{OH} + \text{M} \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M}$	22.204	-2.00	0.0
$\text{H} + \text{O} + \text{M} \leftrightarrow \text{OH} + \text{M}$	16.792	-0.60	0.0
$\text{OH} + \text{OH} \leftrightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	12.760	0.000	390.0
$\text{OH} + \text{CO} \leftrightarrow \text{C O}_2 + \text{H}$	7.176	1.300	-385.0
$\text{O} + \text{CO} + \text{M} \leftrightarrow \text{C O}_2 + \text{M}$	15.732	0.000	2300.0
$\text{H} + \text{CO} + \text{M} \leftrightarrow \text{CHO} + \text{M}$	14.698	0.000	755.0
$\text{CHO} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{H O}_2 + \text{CO}$	13.518	-0.40	0.0
$\text{CHO} + \text{H} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$	14.079	0.000	0.0
$\text{CHO} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	14.000	0.000	0.0
$\text{CHO} + \text{O} \leftrightarrow \text{OH} + \text{CO}$	13.477	0.000	0.0
$\text{C H}_2\text{O} + \text{H} \leftrightarrow \text{CHO} + \text{H}_2$	4.000	3.000	700.0
$\text{C H}_2\text{O} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CHO} + \text{H}_2\text{O}$	13.477	0.000	600.0
$\text{C H}_2\text{O} + \text{O} \leftrightarrow \text{CHO} + \text{OH}$	13.255	0.000	1540.0
$\text{CH}_4 + \text{OH} \leftrightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	7.204	1.830	1400.0

Çizelge 2.1 (devam ediyor)

$\text{CH}_4 + \text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3 + \text{OH}$	7.079	2.100	3840.0
$\text{CH}_3 + \text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{H}$	13.845	0.000	0.0
$\text{CH}_3 + \text{O} \leftrightarrow \text{CHO} + \text{H}_2$	14.146	0.000	860.0
$\text{CH}_3 + \text{CHO} \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}$	12.000	0.000	0.0
$\text{CH}_3 + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{O}_2$	12.301	0.000	0.0
$\text{CH}_3 + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{OH}$	12.301	0.000	0.0
$\text{CH}_3\text{O} + \text{H} \leftrightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2$	13.698	0.000	0.0
$\text{CH}_3\text{O} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	13.397	0.000	0.0
$\text{CH}_3\text{O} + \text{O} \leftrightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{OH}$	13.397	0.000	0.0
$\text{CH}_3 + \text{C H}_3 + \text{M} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + \text{M}$	14.447	-0.40	0.0
$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{H} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{H}_2$	2.740	3.500	2620.0
$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{OH} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O}$	6.549	2.120	439.3
$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{O} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{OH}$	7.953	1.920	2864.0
$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{HO}_2$	12.301	0.000	2510.0
$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{H} \leftrightarrow \text{CH}_3 + \text{CH}_3$	13.681	0.000	0.0
$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{O} \leftrightarrow \text{C H}_3 + \text{C H}_2\text{O}$	13.698	0.000	0.0
$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{C}_2\text{H}_5 \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$	14.146	0.000	0.0
$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3 + \text{CHO}$	13.301	0.000	1300.0
$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{OH} \leftrightarrow \text{CH}_3 + \text{CH}_2\text{O}$	13.602	0.000	760.0
$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{OH} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_3 + \text{H}_2\text{O}$	13.845	0.000	1516.0
$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_3 + \text{H}_2$	14.176	0.000	513.0
$\text{C}_2\text{H}_3 + \text{H} \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2$	13.301	0.000	0.0
$\text{C}_2\text{H}_3 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{HO}_2$	12.000	0.000	0.0
$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O} \leftrightarrow \text{C H}_2 + \text{CO}$	8.612	1.500	854.0
$\text{C H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{C O}_2 + \text{H}_2$	14.000	0.000	1864.0

Çizelge 2.1 (devam ediyor)

$N_2 + O + M \leftrightarrow N_2O + M$	13.740	0.000	10770.0
$N_2O + O \leftrightarrow NO + NO$	14.851	0.000	14100.0
$N + O_2 \leftrightarrow NO + O$	9.806	1.000	3162.0
$N_2O + H \leftrightarrow N_2 + OH$	13.880	0.000	7654.0
$N_2 + O \leftrightarrow N + NO$	14.414	0.000	38390.0
$N + OH \leftrightarrow H + NO$	11.799	0.500	0.0
$NO + O + M \leftrightarrow NO_2 + M$	17.000	0.000	0.0
$NO + HO_2 \leftrightarrow NO_2 + OH$	15.146	0.000	705.0
$NO_2 + O \leftrightarrow NO + O_2$	10.763	0.500	0.0

BÖLÜM 3

AZOT OKSİTLER (NO_x)

Diatomik moleküler azot (N_2) soluduğumuz havanın %79'unu oluşturan inert bir gazdır. Bununla birlikte, kimyasal element azot (N) tek bir atom olarak reaktiftir ve birden beşe iyonizasyon düzeylerine (valans durumu) sahiptir. Valans durumu atomun en dış yörüngesindeki elektron sayısı ile ilgilidir. Bu nedenle azotun birkaç farklı oksiti oluşabilir (Çizelge 3.1). Azotoksitler ve türevleri tuz, asit ya da gaz olarak mevcut olabilir.

3.1 AZOTOKSİTLER VE ÖZELLİKLERİ

Çizelge 3.1 Azotoksitler (EPA 1999).

Formül	İsim	Azot Valansı	Özellikler
N_2O	Diazotoksit	1	Renksiz gaz, suda çözülebilir
NO N_2O_2	Azotoksit Diazotdioksit	2	Renksiz gaz, suda az çözülür
N_2O_3	Diazottrioksit	3	Siyah katı, suda çözülebilir, su içinde bileşenlerine ayrılabilir
NO_2 N_2O_4	Azotdioksit Diazottetraoksit	4	Kırmızı-kahverengi gaz, suda çabuk çözülebilir, su içinde bileşenlerine ayrılabilir
N_2O_5	Diazotpentoksit	5	Beyaz katı, suda çabuk çözülebilir, su içinde bileşenlerine ayrılabilir

Kömür, petrol, doğal gaz v.b. gibi fosil yakıtların yakılması sırasında yakıttaki ve yakma havasındaki azotun oksijenle tepkimeye girmesi sonucu azot oksitler meydana gelir. Yanma ürünü olarak derişimi en yüksek azot oksitler azot monoksit (NO) ve azot dioksittir (NO_2) (URL-2 2005). Literatüre bakıldığı zaman, yanma sonucu ortaya çıkan ve üzerinde durulan azot oksitlerin, NO ve NO_2 gazlarının toplam konsantrasyonu olduğu görülür. Başka bir deyişle N_2O ve diğer azot oksitler bu tanımın (NO_x) dışında kalır. Ayrıca diğer azot oksitlerin kararsız yapıda olmaları nedeniyle NO ve NO_2 verecek şekilde bozdukları bilinmektedir (Arayıcı 1996). Bunlardan NO , NO_x 'in en fazla görünen formudur. Bazı bilim adamları

çalışmalarında, sera gazı olması ve küresel ısınmaya sebep vermesinden dolayı N₂O'nun salınım miktarı üzerinde de durmakta iken bazıları da, bitki ve mayalar gibi biyogenik kaynaklar tarafından da bolca üretilmekte olan N₂O ile ilgili herhangi bir kısıtlama yapılması zorunluluğu olmadığını düşünmektedir (EPA 1999). Bu çalışmada yanma sonuç ürünü NO_x gazları olarak, NO ve NO₂ ele alınmış ve bunlardaki değişimler incelenmiştir.

3.2 AZOT OKSİTLERİN OLUŞUMU

Yanma sonrasında azot oksitlerin oluşmasında, yakıtın cinsi, yanma odasında reaktantların kalma süresi, yakma havasının fazlalığı, yüksek sıcaklık, eksik yanma, yakıtın yüksek sıcaklıkta kalma süresi, yakma sistemleri v.b. gibi faktörler etken olmaktadır. Azot oksitlerin oluşması üç şekilde meydana gelmektedir:

3.2.1 Isıl (Termal) NO_x Oluşumu

Yanma havasında bulunan oksijen atomlarıyla moleküler azotun yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girmesiyle azot oksitlere dönüşümesidir. Zeldovich tarafından $N_2 + O \leftrightarrow NO + N$, $N + O_2 \leftrightarrow NO + O$, $N + OH \leftrightarrow NO + H$ reaksiyonlarıyla tanımlanmıştır. Aktivasyon enerjisi termal azotmonoksit oluşumunda önemli bir etkiye sahip olduğundan dolayı bu oluşum, sıcaklığa çok bağımlıdır ve 1400 °C ve üstündeki yüksek alev sıcaklıklarında gerçekleşmektedir. Yanma odası ve alevdeki yüksek sıcaklık ve fazla hava miktarı (stokiyometrik oranlar), azotmonoksit oluşumunu artırdığından dolayı; azotmonoksit oluşumunu engellemek için bu değişkenlerin kontrol edilmesi gerekir. Yakıtın az, oksijenin fazla olduğu sıcak alev bölgesinde termal NO_x oluşumu en yüksek değerlerine ulaşır.

3.2.2 Yakıt Kaynaklı (Fuel) NO_x Oluşumu

Yakıtta kimyasal olarak bağlı azot bileşiklerinin oksidasyonu sonucu, azotmonoksit oluşmasıdır. Yanma esnasında ve sonunda azotmonoksit oluşumu, yakıttaki azotlu bileşik miktarının artmasıyla artmaktadır. Yakıtta bağlı azotun aktivasyon enerjisi düşük olduğu için oksijenle, sıcaklığa bağlı olmaksızın hızla birleşir. Yakıt kaynaklı NO_x oluşumunda hava/yakıt oranı önemli olup, bu oran düşük olduğunda yüksek miktarda azot oksitler oluşmaktadır.

3.2.3 Ani (Prompt) NO_x Oluşumu

Isıl ve yakıt NO_x mekanizmaları ile açıklanamayan ve yanmanın ilk evrelerinde meydana gelen NO_x'dir. Yakma havasındaki moleküler azotun karbon ve serbest hidrokarbon radikalleriyle (HC, H₂C) tepkimeye girmesi sonucu oluşmaktadır. Örnek, $N_2+HC\leftrightarrow HCN+N$ reaksiyonu ile meydana gelen HCN, OH ile birleşerek CN'yi oluşturur. Sonraki reaksiyon adımlarında CN azot monoksit oksitlenir. Zengin karışımın olduğu yanma koşullarında ani azot oksit meydana gelir ve sıcaklığın etkisinin az olduğu düşünülmektedir (URL-2 2005).

NO₂, temel olarak alevin yüksek sıcaklık bölgelerinde meydana gelen NO'den farklı olarak alevin daha düşük sıcaklıktaki bölgelerinde oluşmaktadır (Waibel 1997).

Çalışmamızda kullandığımız reaksiyon mekanizması, karbon ve hidrokarbonlarla azot reaksiyonlarını içermediğinden dolayı ani NO_x oluşumunun olmadığını; başka bir deyişle yanma süresince sadece ısıl ve yakıt NO_x oluşumlarının vuku bulunduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca gaz kompozisyonlarında hacimsel yüzdesi %1' in altında olan propan, hexan v.b. gibi gazlara ait reaksiyonlar basitleştirme için reaksiyon mekanizması içerisinde yer verilmediğinden hesaplamalarda ihmal edilmişlerdir.

3.3 NO_x OLUŞUMUNU ETKİLEYEN FAKTÖRLER

3.3.1 Yakıt Kompozisyonu

Yakıtın azot içeriği yanma sonu NO_x emisyonunu etkilemektedir. NH₃, HCN gibi azot bileşiği içeren yakıtların yakılması sonucu NO_x oluşumu sadece azot içeren yakıtlara göre daha yüksek çıkmaktadır.

3.3.2 Fazla Hava

Stokiometrik orandaki havadan fazla hava verilmesi ile oksijen konsantrasyonundaki artış NO_x oluşumunu tetikler. Fazla hava toplam alev sıcaklığını düşürerek ısıl verim kaybına da neden olur. Daha fazla hava vermek ile alev sıcaklığı daha çok düşeceğinden ısıl NO_x oluşumu da azalır ve fazla oksijen nedeniyle olan NO_x artışını bu azalma bastırarak toplamda emisyon düşüşüne neden olur.

3.3.3 Ön Isıtma Sıcaklığı

Reaktantların giriş sıcaklığının artırılması alev sıcaklığının da artmasına yol açar. Alev sıcaklığının yükselmesi ısıl NO_x oluşumunu eksponensiyel olarak artırır.

3.3.4 Ocak Sıcaklığı

Düşük ocak sıcaklığı, alevden daha yüksek oranda ısı transferine neden olarak alev alanında gerçek pik alev sıcaklığını düşürür. Pik alev sıcaklığında düşme ısıl NO_x emisyonunu azaltır (Waibel 1997).

3.4 NO_x KONTROL METODLARI

Literatür incelendiğinde NO_x'in kontrol edilmesi ve yanma sonu ürün olarak miktarının düşürülmesi genel olarak şu yöntemlerle sağlanabilmektedir:

- 1) Yanma sıcaklığını düşürmek (Yakıtca zengin karışımlar kullanarak, su veya buhar enjeksiyonu ile soğutulmuş egzoz gazı ya da soğutulmuş oksijen-egzoz gazı karışımı enjeksiyonu ile),
- 2) Yakıtın yüksek yanma sıcaklığında kalma süresini düşürmek,
- 3) Kimyasal olarak NO_x'i azaltma (Selective Catalytic Reduction, Selective Non-Catalytic Reduction),
- 4) NO_x'in oksidasyonu ile (Hidrojen peroksit, hava akışı içersine ozon enjekte ederek),
- 5) Alevden azotun uzaklaştırılması ile (Hava yerine oksijen kullanarak, çok düşük içerikli yakıt kullanarak),
- 6) Sorbe-absorbe ederek (Yanma odasına amonyak, alüminyum oksit veya karbon gibi sorbentlerin enjeksiyonu ile),
- 7) Kademeli yakma ve
- 8) Bu methodların kombinasyonu ile (EPA 1999).

BÖLÜM 4

YANMA SONU EMİSYON DEĞERLERİ VE STANDARTLAR

Fosil kökenli hidrokarbon yakıtların yakılması sonucu çevre ve canlılar üzerinde olumsuz etkileri bulunan farklı tipte ve oranlarda kirleticiler oluşmakta ve bu kirleticilerin emisyon miktarlarını sınırlamak için standartlar getirilmektedir.

4.1 DOĞAL GAZ YANMASI EMİSYONLARI

Doğal gazın yakılması sonucu oluşan çevre kirletici emisyonların, diğer yakıtların kullanılmasıyla oluşan emisyonlarla karşılaştırıldığında çok az olduğu ve bunun büyük ölçekli kullanımlarda da değişim göstermediği görülmektedir. Çizelge 4.1’de Almanya’da konutlarda ve küçük birimlerde ısıtma amaçlı kullanılan kazanların yakıt cinsine göre emisyon değerleri, Çizelge 4.2’de ise kuvvet santralleri emisyonları verilmiştir.

Çizelge 4.1 Birim enerji üretim için emisyon değerleri (Küçükali 1995).

Yakıt Cinsi	Emisyon Miktarları (mg/kcal)				
	SO ₂	NO _x	CO	İs	Organik Bileşen
Taş Kömürü	2.10	0.42	26.7	1.04	1.04
Fuel-oil	2.04	0.75	0.04	0.12	0.03
Mazot	0.54	0.21	0.21	-	0.04
Doğal Gaz	0.01	0.21	0.25	-	0.01

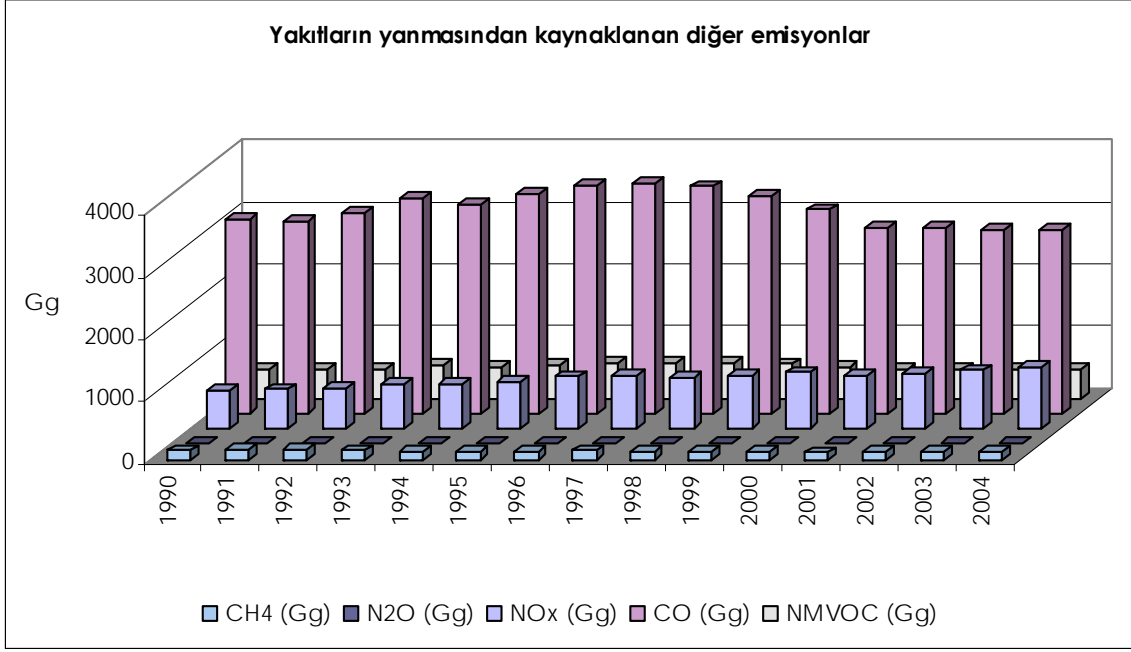
Çizelge 4.2 Kuvvet santralleri emisyonları (Arayıcı 1996).

Yakıt	Tesis Tipi	Tesis Verimi (%)	SO ₂ Emisyonu (ton/MW-yıl)	Tanecik Emisyonu (ton/MW-yıl)	NO _x Emisyonu (ton/MW-yıl)
Kömür (%3 S)	Kuru Duvardan Ateşli	34	180	234	41
Kömür (%3 S)	FBC	33.8	27	I (ESP)	23
Kömür (%3 S)	IGCC	38	2	I (ESP)	20
Ağır fuel-oil (%3 S)	Boiler	35.2	126	207	36
Hafif fuel-oil (%3 S)	FARMA Türbini	27.8	15	5	21
Doğal gaz (%0.002 S)	Boiler	35.2	0.07	0.3	26
Doğal gaz (%0.002 S)	Gaz T., Kombine	44.7	0.06	0.2	4

FBC: Akışkan yatakta yanma, IGCC: Kömür gaz bileşik çevrimi, ESP: Elektro-statik çöktürme

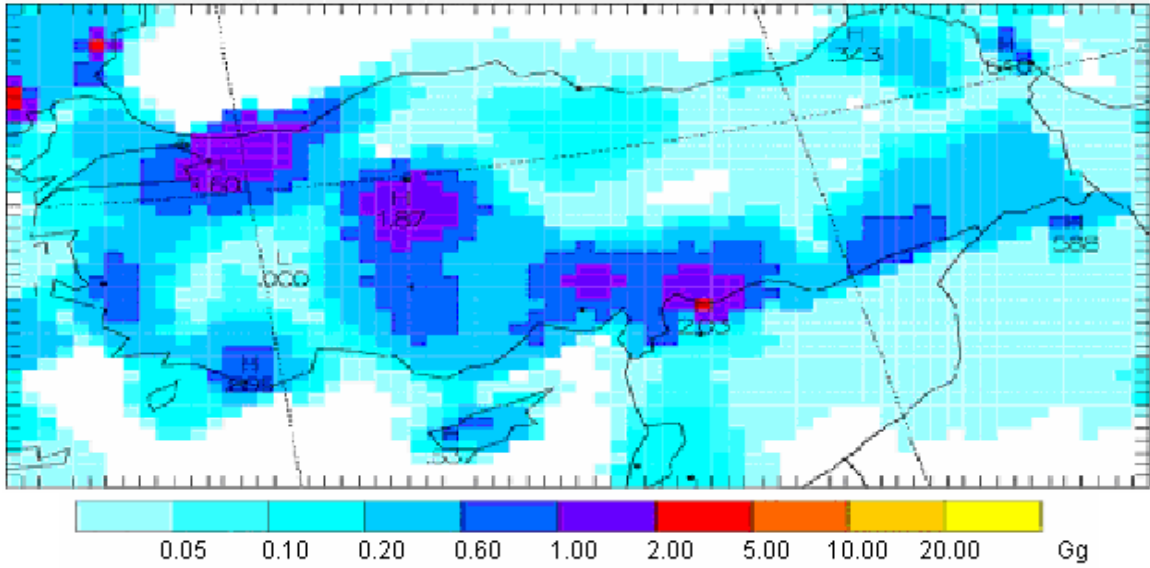
FARMA Türbini: Buhar türbininden elde edilen elektriğin güç seviyesini sürdürmek amacıyla kazan basınç ve su seviyesini korumak için Fuzzy (bulanık) mantığıyla kontrol edilen bir çeşit türbin. (FARMA: Fuzzy Auto-Regressive Moving Average)

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Çevre ve Orman Bakanlığı, Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı, çeşitli üniversiteler ve ilgili özel kurumların oluşturduğu çalışma gruplarının katkısıyla hazırlanmış Sera Gazları Emisyon Envanteri Çalışma Grubu 2006 Taslak Raporunda, yakıtların yakılmasından kaynaklanan emisyon değerleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Yakıtların verimli yanmamasından kaynaklanan, en büyük emisyonların CO emisyonları olduğu ve karbonmonoksiti sırasıyla azotoksitler (NO_x), NMVOC, metan (CH₄) ve diazotmoksitin (N₂O) izlediği görülmektedir (URL-3 2005).



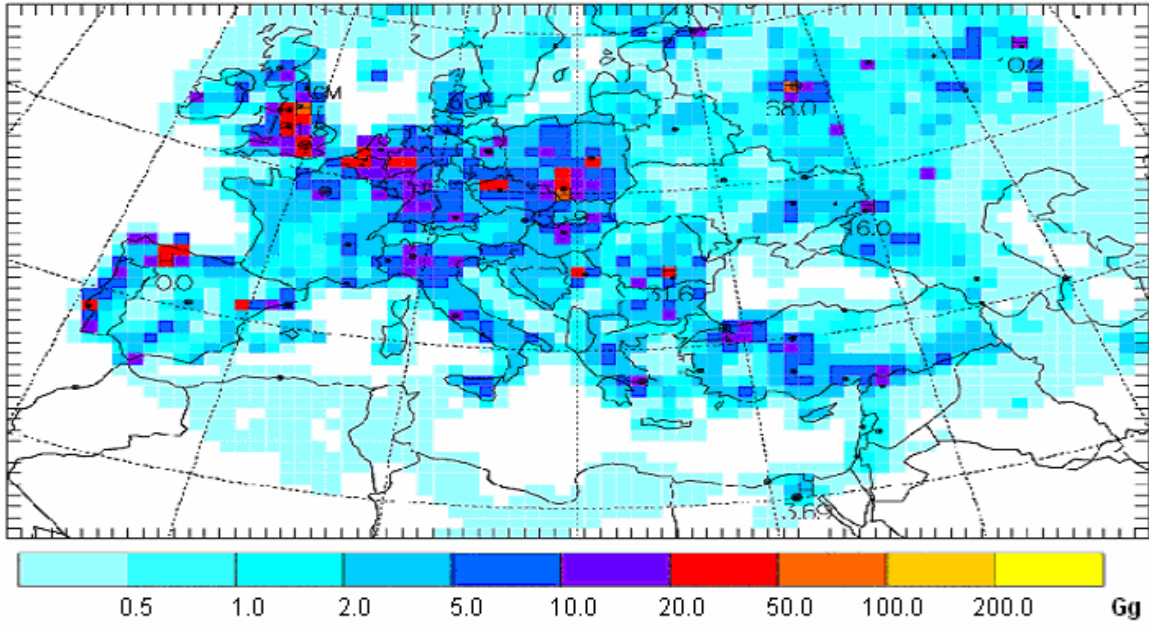
Şekil 4.1 Yakıtların yanmasından kaynaklanan toplam CH₄, N₂O, NO_x, CO, NMVOC emisyonları (URL-3 2005).

NMVOC (İçinde metan olmayan uçucu organik bileşik): Benzin, etanol, formaldehit, aseton v.s.



Şekil 4.2 Türkiye'de NO_x yüksek seviye emisyonları (URL-4 2007).

Şekil 4.2'de Türkiye'nin Marmara, İç Anadolu ve Doğu Anadolu'nun kuzey batı bölümünde yıllık NO_x salınımının, bu bölgelerdeki sanayi, nüfus yoğunluğu, araç trafiği, ısı ve enerji üretim tesislerindeki (kazanlar, santraller v.b.) artış nedeniyle diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu gözükmektedir. Şekil 4.3' de ise Avrupa bölgesine ait NO_x emisyon haritası verilmektedir.



Şekil 4.3 Avrupa'da NO_x yüksek seviye emisyonları (URL-4 2007).

4.2 EMİSYONLARIN ZARARLI ETKİLERİ

İs ve katı partiküller: Solunum yolu hastalıklarına, bitki yapraklarını kaplayarak solunum yapamamalarına ve çevre kirliliğine sebep olur,

Kükürtoksitler (SO_x): Canlılar için zehirleyici etkiye sahiptir. Bitkilerin klorofil üretimini engeller ve ölmesine neden olur, su ile birleşip asit oluşturarak yapı ve metallerde aşınmaya sebebiyet verir,

Karbonmonoksit (CO): Kandaki alyuvarları tahrip ederek ölüme yol açan çok zehirleyici bir gazdır,

Karbondioksit (CO₂): Sera etkisiyle küresel ısınmaya neden olur (Küçükali 1995).

Azotoksitler (NO_x): Kandaki hemoglobinle birleşerek kanın oksijen taşıma kapasitesini azaltır, fotokimyasal sise (fog) neden olur, solunum yolları ve akciğer zarında tahribata yol açar, akciğerlerde hücresel düzeyde değişikliklere yol açar ve bakteriyel ve viral enfeksiyonlara karşı direnci azaltır (URL-9 2007)., ozonun dengesini bozar, küresel ısınmaya (EPA 1999) ve asit yağmurlarına sebep olur (N20), bitki örtüsü ve ağaçlara zarar vererek çöl etkisi yaparlar (Küçükali 1995).

4.3 NO_x HAVA KALİTE STANDARTLARI

Emisyon standartları ülkelere ve bölgelere göre farklılık göstermekte olup Çizelge 4.3'teki değerler Dünya Bankası'nın verilerinden elde edilmiştir (URL-5 2007).

Çizelge 4.3 Asya ülkeleri ve diğerlerinde hava kalite ve emisyon standartları (NO_x) (URL-5 2007).

Ülke	Yıllık Ortalama (mg/m ³)	24 Saat Max (mg/m ³)	Günlük Ortalama (mg/m ³)
Çin	0.12	0.15	0.1-0.15
Hindistan	0.03-0.12	-	0.0925
Endonezya	-	-	0.093 (0.05 ppm)
Filipinler	-	0.19 (0.1 ppm)	-
Polonya	0.05	-	0.15
Tayland	-	0.32	-
Dünya Bankası	0.1 (0.05 ppm)	-	0.5
ABD	0.1 (0.05 ppm)	-	-
Almanya	0.1 (0.05 ppm)	-	0.3 (0.15 ppm)
Japonya	-	-	0.04-0.06
Avrupa Birliği	0.2	-	-

4.4 TÜRKİYE'DE EGZOS EMİSYONU SINIR DEĞERLERİ

Bölgesine ve çevre ile ilgili düzenlemelerine tabi olduğumuz Avrupa Birliği standartlarına göre gaz yakıtlı araçlar ve doğal gazla çalışan kazanlarda olması gereken emisyon değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Gaz yakıt motorlu 0 km araçlarda emisyon standartları (URL-6 2007).

Satır	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	CH ₄ (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Partikül (g/kWh)
A	5.45	0.78	1.60	5.0	0.16-0.21
B1	4.00	0.55	1.10	3.5	0.03
B2	4.00	0.55	1.10	2.0	0.03
C	3.00	0.40	0.65	2.0	0.02

A : 01.01.2007 tarihinden önce uygulanan değerler.

B1-B2-C: 01.01.2007 tarihinden sonra uygulanan değerler.

Çizelge 4.5 Doğal gaz yakıtlı kazanlarda NO_x sınırlaması (URL-7 2007).

	01.01.2000'den önce	01.01.2000'den sonra
CE Sınıf 1	< 260 mg/kWh	< 200 mg/kWh
CE Sınıf 2	< 200 mg/kWh	< 150 mg/kWh
CE Sınıf 3	< 150 mg/kWh	< 100 mg/kWh
CE Sınıf 4	< 100 mg/kWh	< 80 mg/kWh
CE Sınıf 5	< 70 mg/kWh	

Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi Türkiye'de 01.01.2007 tarihinden sonra gaz yakıt motorlu araçların emisyon değerleri önemli oranda düşürülmüştür. Aynı şekilde doğal gaz yakıtlı kazanlarda da 01.01.2000 tarihinden sonra NO_x değerleri %20-30 oranlarında düşürülmüştür. Bu konuda en katı uygulama <20 mg/kWh ile Avrupa'da, Almanya'nın Hamburg şehrine aittir.

BÖLÜM 5

BİLGİSAYAR PROGRAMININ TANITIMI, KOŞULMASI VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, metan gazı, Rusya ve İran'dan satın alınan doğal gazlar ve Tekirdağ'da çıkarılan doğal gazın yanmasını CREK'te simüle ederek, yanma sonunda ürün olarak oluşan NO_x miktarlarının, reaktant giriş sıcaklıkları, reaktant kütle miktarları ve hava içindeki nem oranı değerlerinin değiştirilmesi ile nasıl bir değişim gösterdiğini incelenmiştir.

5.1 CREK'İN TANITILMASI

Bu çalışmada, yanma olayının sonunda oluşan ürün konsantrasyonlarını bulmak ve bu konsantrasyonların, farklı koşullarda ne şekilde değişim gösterdiği belirlenmek istenmiştir. Literatürde bu amaca uygun olarak, yanma olaylarını simüle eden (ürün konsantrasyonlarını hesaplayan) bilgisayar programları mevcuttur. Burada bu programlardan biri olan CREK tanıtılacaktır.

CREK (A Computer Program for Calculation of Combustion Reaction Equilibrium and Kinetics in Laminar or Turbulent Flow- Laminar ve Türbulanslı Akışta Yanma Reaksiyonu Denge ve Kinetiğinin Hesaplanması İçin Bilgisayar Programı), toplam kütle ve momentum korunum denklemlerini çözerek hız ve basınç gibi değişkenlerine göre ürün konsantrasyonlarını hesaplayan bir bilgisayar programıdır. CREK altı alt programdan oluşmaktadır: CREK, CREK0, ERATIO, SPECE, CALC ve HCPS. CREK'e ait alt programlar, kullanıcı tarafından, belirlenmiş bir probleme göre yapılan bir ana program tarafından çağırılırlar. CREK'in Alt Programları;

CREK: Herhangi bir düğüm noktası için, ana program tarafından çağrılarak ilgili çözüm hücresinin yakıt-hava oranını hesaplar ve denge veya kinetik çözümden hangisinin yapılacağına karar verir. Çözümün tam olarak yapılamadığı durumda, yakınsama yöntemlerini uygular.

CREK0: Kinetik çözüm için tanımlanan elementer reaksiyonlara ait geri reaksiyon hız sabitlerini hesaplar. Bu alt program ilk çağırıldığında; 1) Yanma modelinde kullanılan bileşenlerde bulunan elementlere ait sembol, atom ağırlıkları ve valans elektron sayılarını, 2) Termodinamiksel büyüklüklerin hesaplanmasını sağlayan polinom katsayılarını ve 3) Kurulan reaksiyon mekanizmasına ait reaksiyon denklemlerini ve hız sabitlerini okur. Bundan sonraki her çağırıldığında ise ayrı bir reaktant bilgilerini okur.

ERATIO: Elementlerin pozitif veya negatif yüklerini göz önünde bulundurarak, yakıt/hava oranını hesaplar.

SPECE: Çözüm hücresi için hem denge hem kinetik yaklaşımda kullanılmak üzere Newton-Raphson iterasyonunu gerçekleştirir ve iterasyonlara ait yakınsama parametresini hesaplayarak yakınsama şartının sağlanıp sağlanmadığını kontrol eder.

CALC: Hem denge hem de kinetik çözüm için Newton-Raphson düzeltme matrislerini oluşturur ve Gauss eliminasyon yöntemini kullanarak matrislerin çözümünü yapar.

HCPS: Reaksiyonlarda geçen bileşenlere ait entalpi, entropi v.b. gibi termodinamiksel özelliklerini, girilen sıcaklık değerini göre polinom uyum katsayılarını kullanarak hesaplar.

5.2 TERMOKİMYASAL VERİ DOSYASI

Ana program tarafından çağrılan CREK0 alt programının termokimyasal verileri okuduğu DAT uzantılı veri dosyası dört tip veri içerir. Bunlar, element verileri, termodinamiksel özellik verileri, reaksiyon mekanizması verileri ve reaktant verileridir.

5.2.1 Element Verileri

Bileşenleri oluşturan elementlerin sembol, atom ağırlığı ve elektron sayısıdır.

5.2.2 Termodinamiksel Özellik Verileri

Her bileşen için dört satırdan ibaret olup entalpi, entropi v.b. gibi termodinamiksel büyüklüklerin hesaplanmasında kullanılan katsayılardır. İlk satır bileşenin adı ve katsayıların

geçerli olduğu sıcaklık aralığı bilgilerini gösterir. Sonraki üç satırda bulunan 14 adet katsayının ilk 7'si 1000-5000 K, son 7'si ise 300-1000 K sıcaklık aralığı için geçerli olup aşağıda verilen formüllere göre, termodinamiksel özelliklerin hesaplanmasında kullanılır. C_p ısınma ısısını, R_u evrensel gaz sabitini, h entalpiyi T sıcaklığı ve z 'ler de polinom uyum katsayıları olmak üzere,

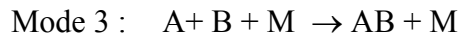
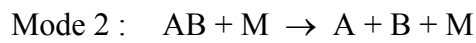
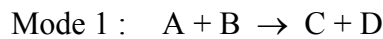
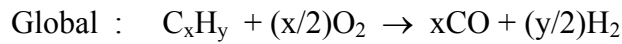
$$\frac{C_p}{R_u} = z_1 + z_2 T + z_3 T^2 + z_4 T^3 + z_5 T^4 \quad (5.1)$$

$$\frac{h}{R_u T} = z_1 + \frac{z_2 T}{2} + \frac{z_3 T^2}{3} + \frac{z_4 T^3}{4} + \frac{z_5 T^4}{5} + \frac{z_6}{T} \quad (5.2)$$

$$\frac{s^0}{R_u} = z_1 \log T + z_2 T + \frac{z_3 T^2}{2} + \frac{z_4 T^3}{3} + \frac{z_5 T^4}{4} + z_7 \quad (5.3)$$

5.2.3 Kinetik Veriler

Reaksiyonların hız katsayıları ve açık yazılışlarıdır. CREK programı gaz fazındaki reaksiyonları kabul etmekte olup veri dosyasına yazılan reaksiyonlar, aşağıda verilen dört farklı reaksiyon tipinden biri olmak zorundadır.



5.2.4 Reaktant Verileri

Reaktantların sembolleri ve mol oranlarıdır. Yanma hücrelerine birden fazla yakıt, karışım veya hava girişi olması durumunda, önlerine REACTANTS-1, REACTANTS-2 gibi satırlar eklemek suretiyle bunların tanımlamaları veri dosyasında yapılabilir (Pratt and Wormeck 1976).

5.3 VERİ DOSYASININ OLUŞTURULMASI VE TAKİP EDİLEN YOL

İlk önce element verileri, termodinamik özellik verileri, reaksiyon mekanizması verileri ve reaktant verilerini içeren .DAT uzantılı termokimyasal veri dosyası oluşturulması gerekmiştir. Hava/yakıt oranı, veri dosyasının içerisinde reaktant verilerinin girildiği bölümde yakıtın mol sayısının değiştirilmesiyle ayarlanabilmekte iken, giriş sıcaklığı, toplam kütle miktarı (EMV) değeri, basınç ve diğer özellikler ana program içinde değiştirilebilmektedir.

Sabit bir giriş sıcaklığı (T_g) ve EMV değeri için, hava/yakıt oranı veri dosyasından 0.6'dan 1.4'e kadar 0.1 artıralarak, herbir oran için program ayrı ayrı koşulmuş, böylece her bir yakıt için tek bir giriş sıcaklığı ve EMV değerinde, hava/yakıt oranındaki değişime bağlı olarak NO_x salınım miktarındaki değişim gözlemlenmiş ve NO_x miktarının en yüksek olduğu hava/yakıt oranı saptanmıştır. Sonra aynı giriş sıcaklığında diğer EMV değerleri (0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 kg/(m³.s)) için bir önceki oran değişiklikleri tek tek yapılarak simülasyona devam edilmiştir. Bu işlemler giriş sıcaklığı 223 K-323 K aralığında 10 K'lik artışlarla ve farklı EMV değerleri için, yanma sonucu oluşan NO_x miktarları elde edilmiş ve NO_x miktarlarındaki değişimler incelenmiştir. Yakma havasındaki nem oranının NO_x miktarı üzerindeki etkisini incelemek için, reaktant giriş sıcaklığı ve yakıt/hava eşdeğer oranı sabit tutularak hesaplamalar yapılmıştır.

Çalışma içerisinde yakıt olarak dört farklı gaz kullanılmıştır. Bunlar; metan, İran-Güney Pars, Rusya-Shebelinka ve Tekirdağ bölgesi doğal gazlarıdır (Çizelge 5.1). İran ve Rusya'dan aldığımız doğal gazların kompozisyonu devletlerarası yapılan ikili anlaşmalar gereği ilgili kurumlardan temin edilememiştir. Bu sebepten dolayı literatür araştırması yapılarak Rusya'nın Shebelinka bölgesi ve İran'ın Güney Pars sahasından çıkarılan doğal gazların kompozisyonları kullanılmaya karar verilmiştir. İran doğal gazının bileşenlerini Javanmardi et al. (2006)'dan, Rusya doğal gazını Dinka et al. (2006)'dan ve Tekirdağ bölgesi doğal gazının bileşenleride Arın ve Akdemir (2002)'den alınmıştır. Çizelge 5.2 dünyanın farklı bölgelerinde çıkartılan bazı doğal gaz kompozisyonlarını göstermektedir.

Çizelge 5.1 Çalışmada kullanılan doğal gaz kompozisyonları.

Bileşenler	Metan	Rusya-Shebelinka	İran-Güney Pars	Tekirdağ
Metan (%)	100.0	96.2	97.4	92.6
Etan (%)	0	1.2	0	0.5
Propan (%)	0	0.3	0	0.1
Azot (%)	0	1.8	0	6.4
Karbondiyoksit (%)	0	0.3	2.1	0.1
Diğerleri (Butan, pentan, heksan, su)	0	0.2	0.5	0.3

Çizelge 5.2 Bazı doğal gaz kompozisyonları (El-Sherif 1998).

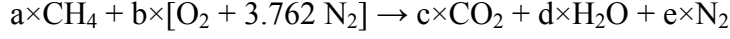
Bileşenler	LNG	Mısır DG	Pittsburg DG	CARB
Metan (%)	100.0	93.80	85.48	88 min.
Etan (%)	0	3.28	13.85	6 max.
Propan (%)	0	1.20	0	3 max.
CO ₂ (%)	0	0.53	0	0
N ₂ (%)	0	0.19	0.67	3 max.
Diğerleri (Butan, pentan, heksan, su, kükürt v.b.)	0	1.00	0	0

CARB: Doğal gaz kalite standartlarını belirleyen kurum-California Air Resources Board.

LNG: Sıvılaştırılmış doğal gaz (Normal şartlarda %99.6'sı metan, ekstrem durumda %100'ü olmaktadır)

5.4 METAN VE DOĞAL GAZIN KURU VE NEMLİ HAVA İLE STOKİOMETRİK YANMASINDA KATSAYILAR

1 kmol kuru hava için;



1 kmol nemli hava için nem oranı;

$$w = \frac{m_{sb}}{m_{kh}} \quad (5.4)$$

Mol sayısı;

$$n_{sb} = \frac{m_{sb}}{M_{sb}} \quad (5.5)$$

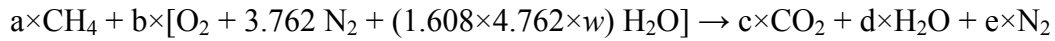
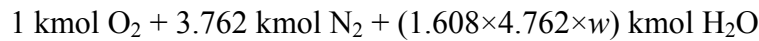
$$n_{kh} = \frac{m_{kh}}{M_{kh}} \quad (5.6)$$

$$n_{sb} = \frac{m_{sb}}{M_{sb}} = \frac{wm_{kh}}{M_{sb}} = \frac{wn_{kh}M_{kh}}{M_{sb}} = \frac{M_{kh}}{M_{sb}} wn_{kh} = \frac{28.964}{18.015} wn_{kh} = 1.608 wn_{kh} \quad (5.7)$$

$n_{kh} = 1$ kmol için nemli hava bileşimi;

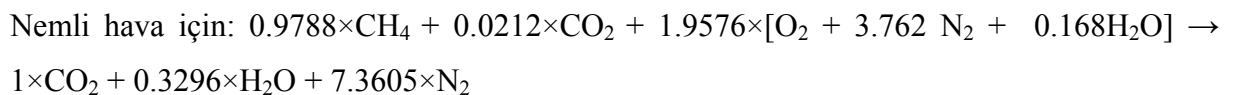
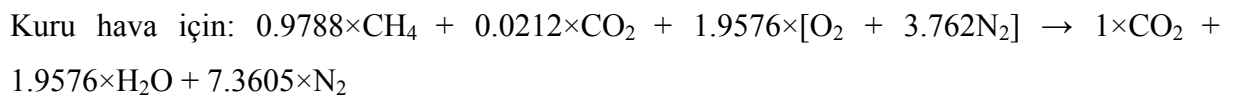


Buradan;



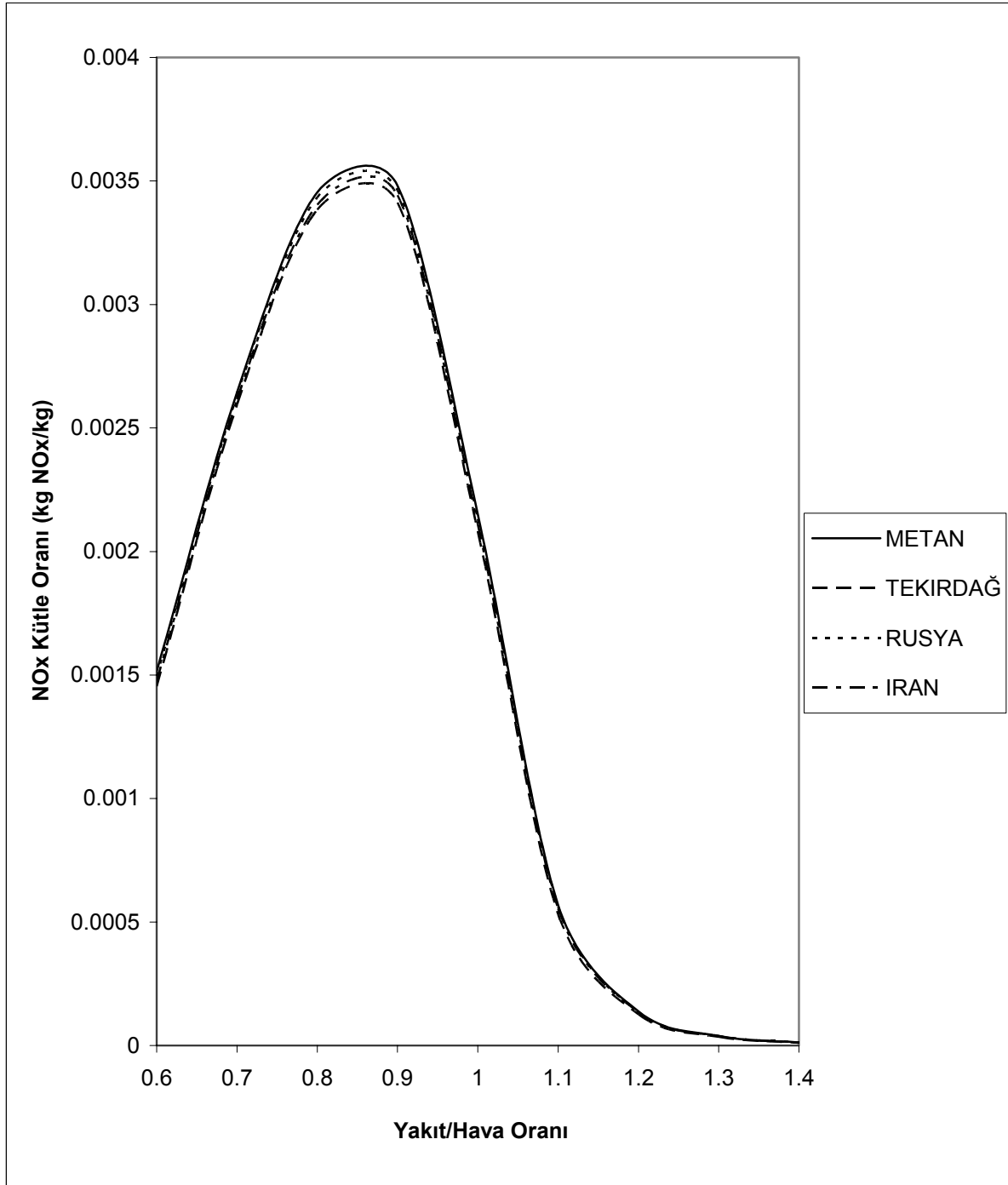
a, b, c, d ve e katsayılarının kuru ve nemli hava yanmaları için belirlenmesi gerekir. Doğal gazın stokiometrik yanması için bu denklemlerde metanın yerine doğal gazı meydana getiren bileşenler yazılarak katsayı hesapları yapılır. İlgili katsayılar Ek II'de verilmiştir.

Örnek; İran-Güney Pars doğal gazı ve $w=0,022$ kg_{sb}/kg_{kh} için,



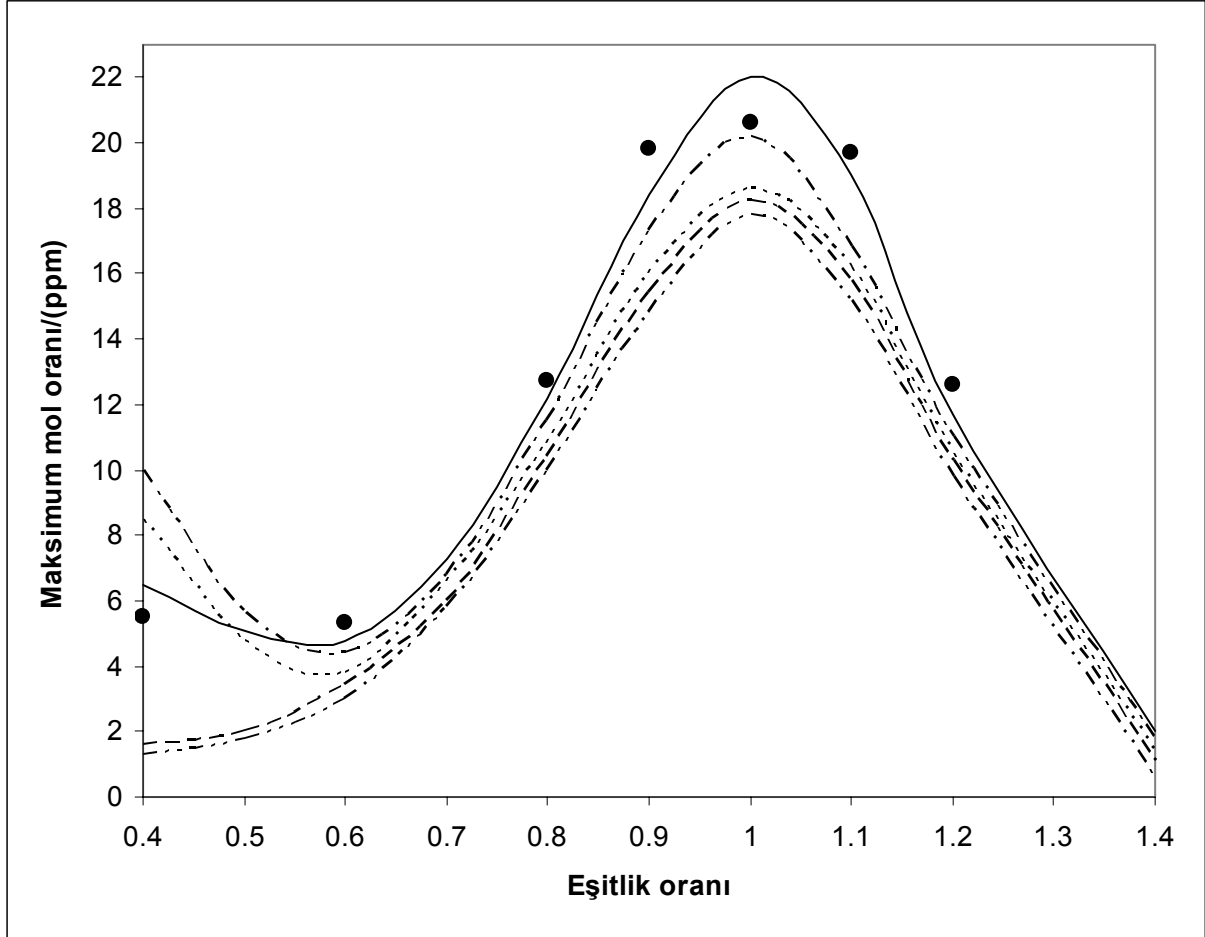
5.5 ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Sabit bir sıcaklık ve EMV değeri ve farklı yakıt/hava eşdeğer oranlarında NO_x emisyon miktarlarındaki değişimlere bakıldığında kullanılan yakıtlar için $\Phi=0.88$ de emisyonun maksimuma ulaştığı Şekil 5.1’de görülmektedir.



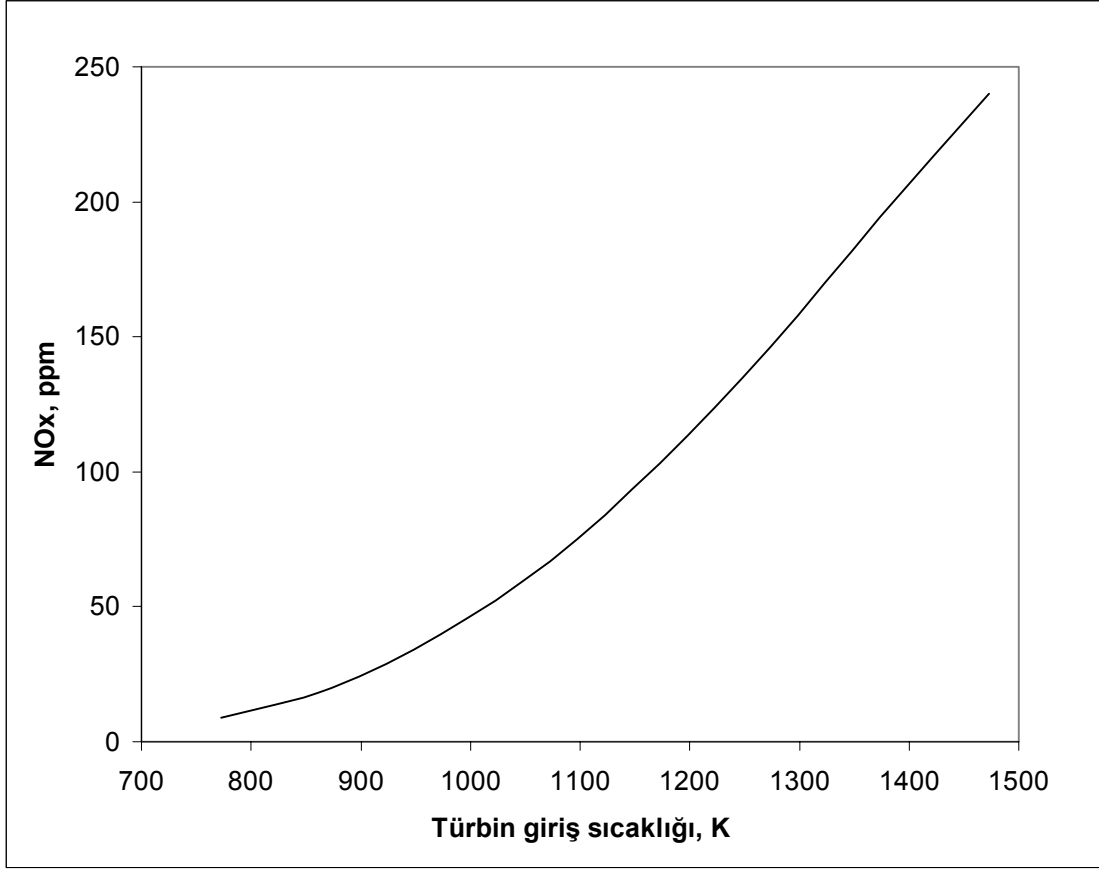
Şekil 5.1 Yakıt / Hava oranına göre NO_x kütle oranı ($T_g = 298 \text{ K}$, $\text{EMV} = 0.01 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$).

Şekil 5.2’de El-Sherif’in (1998) metan, Mısır, Pitspurg ve CARB doğal gazlarının yanması için yapmış olduğu deneysel ve teorik çalışmaya göre, eşitlik oranının 1 olması durumunda NO_x mol oranının maksimum olduğu görülmektedir.

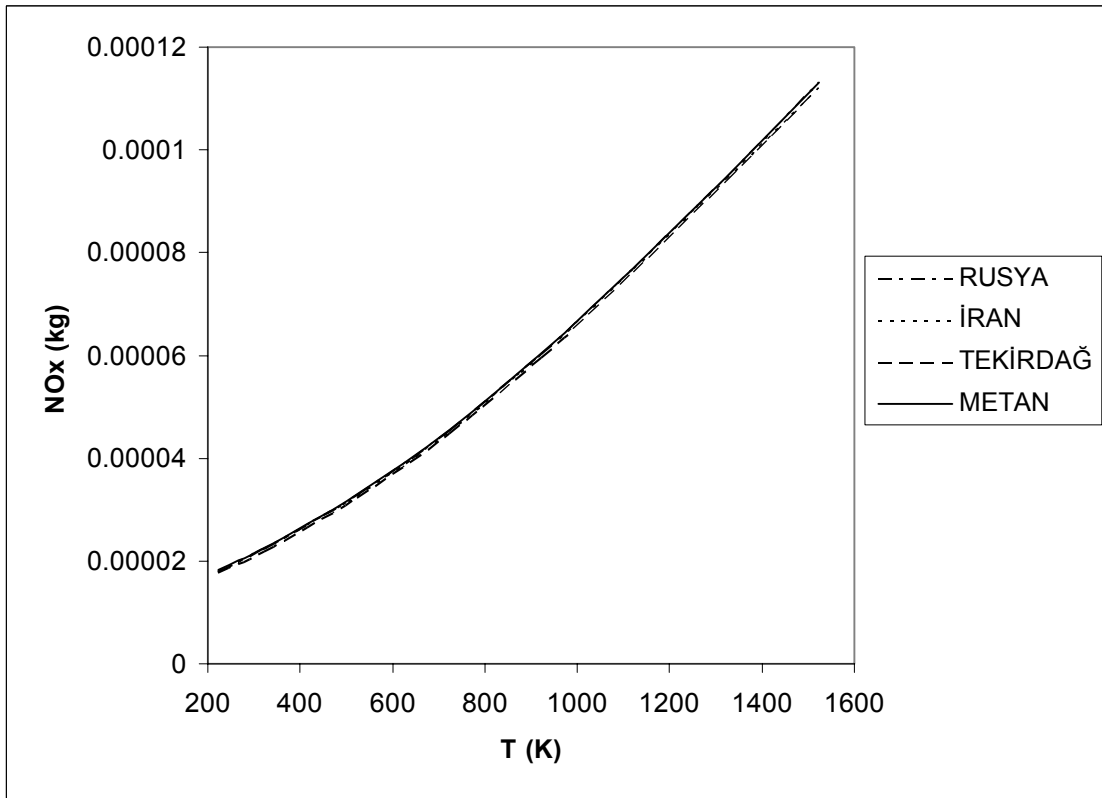


Şekil 5.2 Eşitlik oranına göre maximum mol oranı ($T=300$ K, $P=1$ Atm) . Nokta ve düz çizgi Mısır doğal gazı için yapılmış olan deneysel ve hesaplanmış NO_x mol oranını göstermekte. Kesik çizgi noktali: metan, noktali: Mısır, kesik çizgili: Pitspurg ve kesik çizgili iki noktali: CARB doğal gazları için hesaplanmış NO mol oranlarını göstermektedir (El-Sherif 1998).

Waibel (1997) artan yakma havası sıcaklığının yanma sonu NO_x salınımını da artırmakta olduğunu belirtmiştir. Gaz-hava ön karışımli bir yakma sisteminde yakma havasının sıcaklığındaki her bir 3 derecelik artış, gazı 1 derece ısıtmaktadır (Alasfour 1997). Zevenhoven and Kilpinen (2004) yapmış oldukları çalışmada türbin giriş sıcaklığındaki artışın NO_x salınımını da arttırdığı görülmektedir (Şekil 5.3).

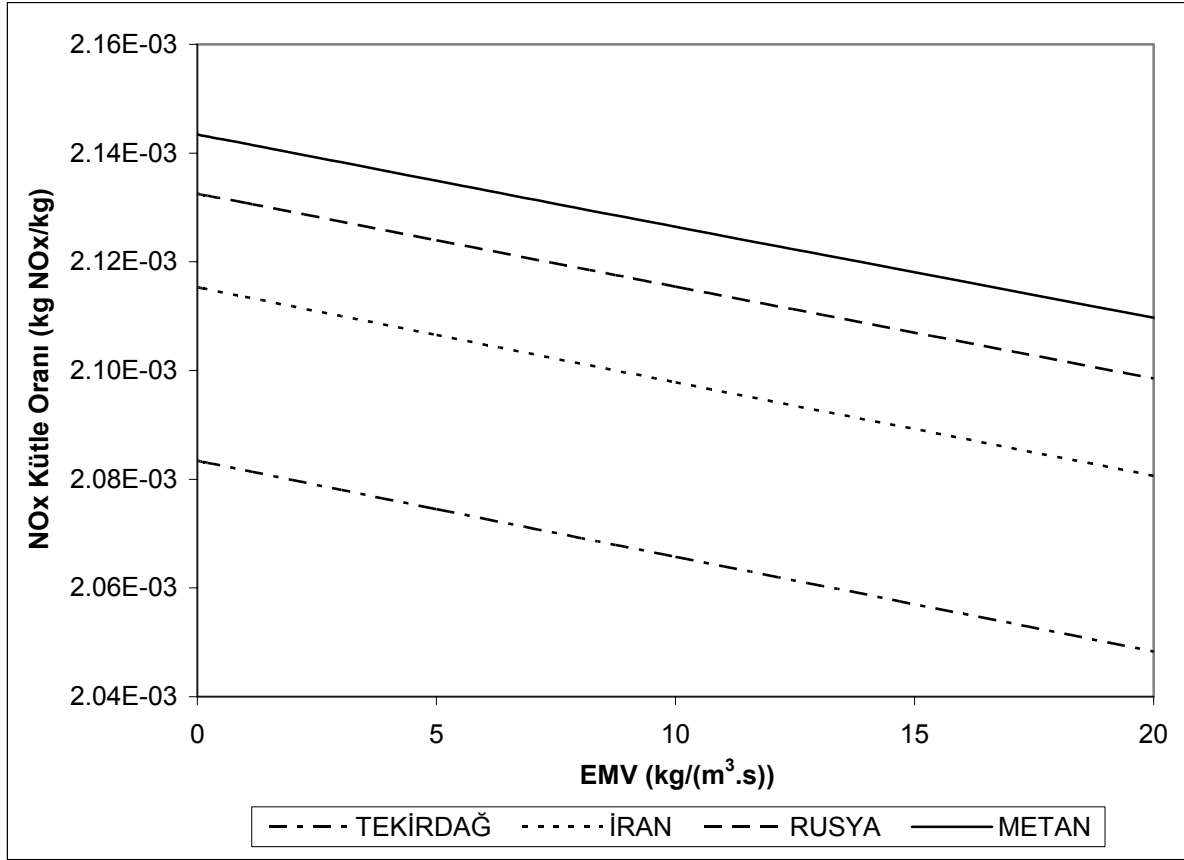


Şekil 5.3 Türbin giriş sıcaklığı-NO_x arasındaki ilişki (Zevenhoven and Kilpinen 2004).



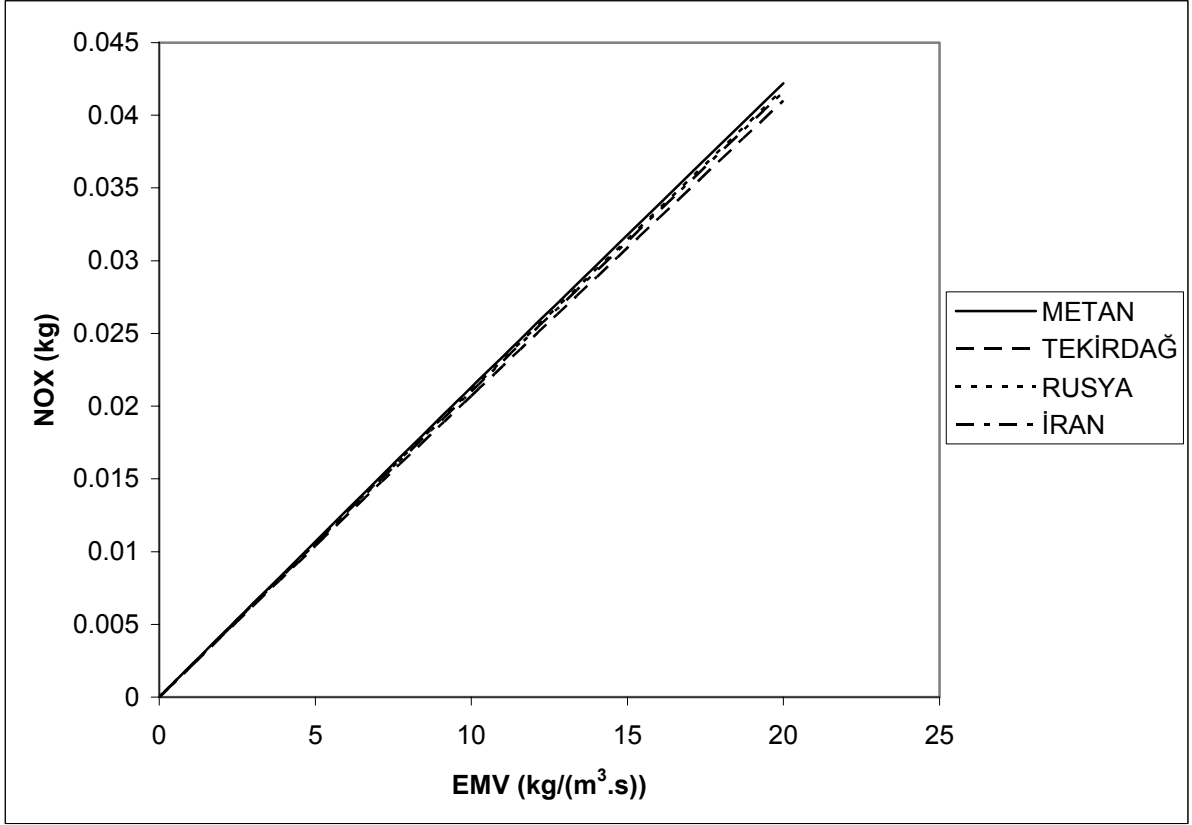
Şekil 5.4 Reaktant giriş sıcaklığı - NO_x arasındaki ilişki.

Şekil 5.4’de ise reaktant giriş sıcaklığındaki artışın azot oksit salınım miktarı üzerindeki etkisi tüm yakıtlar için verilmiştir.

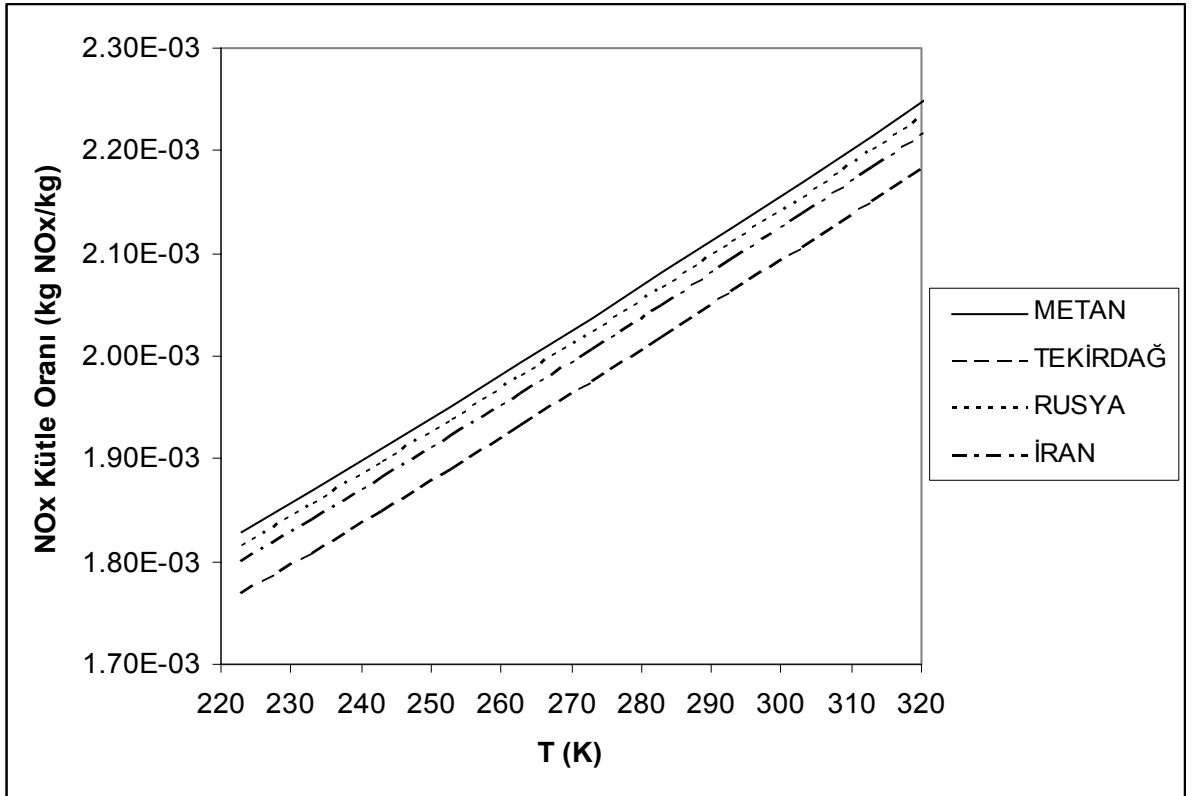


Şekil 5.5 EMV’ye göre NO_x kütle oranındaki değişim ($T_g = 298$ K, $\Phi = 1.0$ için)

Yakıt olarak kullanılan tüm gazlar için toplam reaktant giriş kütlelerinin (EMV) artırılması NO_x kütle oranlarında azalmaya neden olmaktadır (Şekil 5.5). EMV artırıldığı zaman yanma sonucu NO_x salınım miktarında artmakta olduğu Şekil 5.6’da görülmektedir.



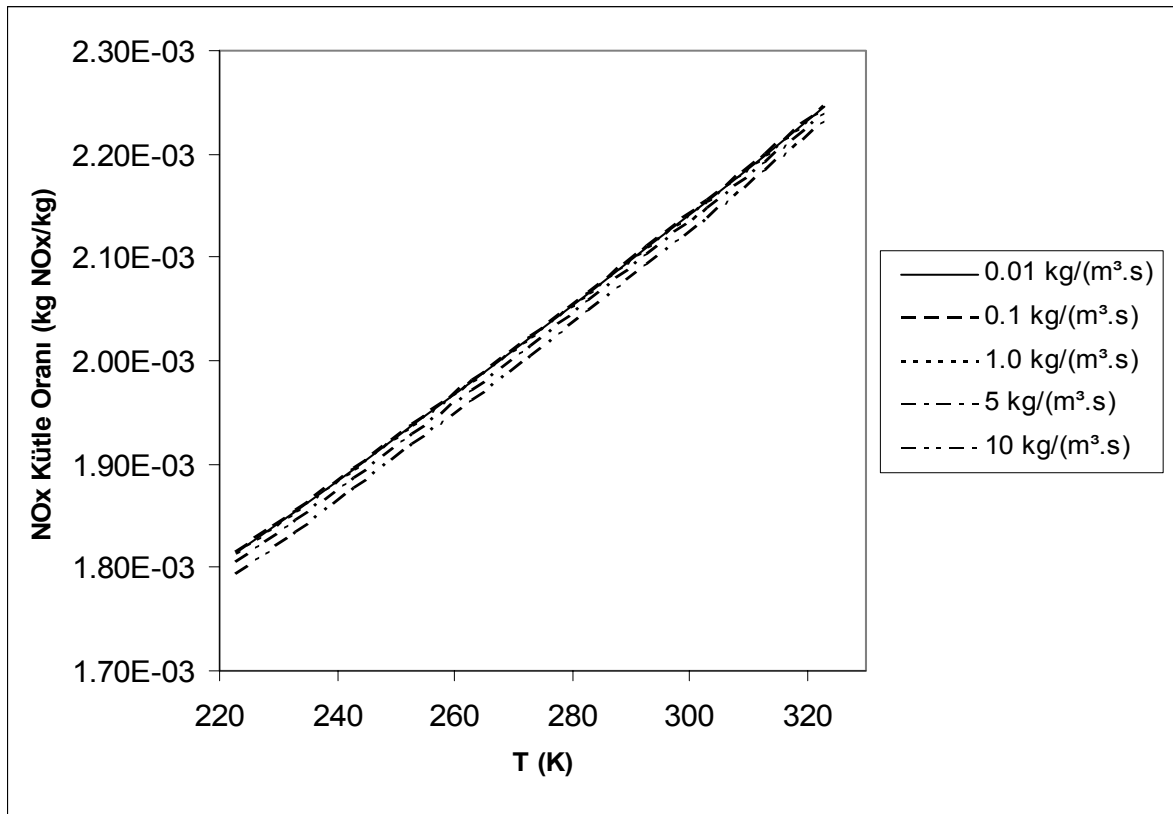
Şekil 5.6 Reaktant kütle miktarındaki değişime göre yanma sonu NO_x miktarı ($T_g = 298$ K, $\Phi = 1.0$).



Şekil 5.7 Sıcaklığa göre NO_x kütle oranındaki değişim ($EMV = 0.01$ kg/(m³.s), $\Phi = 1.0$ için)

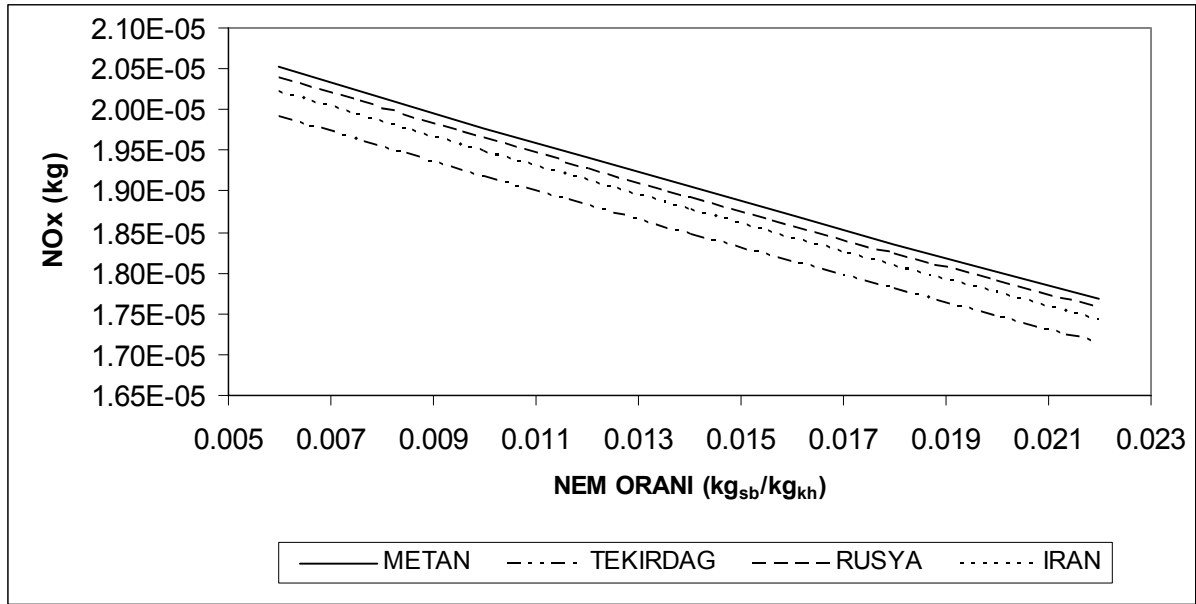
Türkiyenin kışın en soğuk ilinin sıcaklık ortalaması $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve yazın ise en sıcak ilinin sıcaklık ortalaması $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu düşünülürse ve bu değerlerin reaktant giriş sıcaklığı olduğunu varsayılırsa, iki uç sıcaklık için NO_x emisyonu tüm yakıtlar için yaklaşık %20'lik bir değişim gösterdiği Şekil 5.7'de görülmektedir.

Rusya-Shebelinka bölgesinden çıkartılan doğal gazın değişik EMV değerlerinde farklı reaktant giriş sıcaklıklarında yakılmasıyla oluşan NO_x emisyonları Şekil 5.8'de sunulmuştur.



Şekil 5.8 Rusya doğal gazı için farklı EMV değerlerinde sıcaklığa göre NO_x kütle oranındaki değişim ($\Phi = 1.0$ için)

Şekil 5.9'da sabit bir reaktant giriş sıcaklığı ve yakıt/hava eşdeğer oranı için, yakma havasının nem oranındaki değişimin yanma sonu NO_x miktarı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Nem oranındaki değişimin Türkiye'nin hemen her yerinde $6\text{ g}_{\text{sb}}/\text{kg}_{\text{kh}}$ ile $22\text{ g}_{\text{sb}}/\text{kg}_{\text{kh}}$ değerleri arasında kalacağı varsayılmıştır.



Şekil 5.9 Yakma havası nem oranındaki değişimin yanma sonu NO_x miktarı üzerindeki etkisi ($\Phi = 1.0$, $T_g = 303$ K ve $EMV = 0.01$ kg/(m³.s) için)

Şekil 5.9'dan görüldüğü gibi hemen her doğal gazın yakılmasında nem oranındaki 3 kat artış NO_x miktarını %10 kadar azaltmaktadır.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada, yanma olaylarının sonunda yanma ürünü olarak ortaya çıkan ve kirleticilerden biri olan azot oksitlerin (NO_x) oluşumu ve miktarı, metan (CH_4), Rusya-Shebelinka, İran-Güney Pars ve Tekirdağ doğal gazlarının yanması için incelenmiştir. Yanma sonu ürün konsantrasyonları için literatürden, denge ve kinetik şartlarda çözüm yapan CREK adlı bilgisayar programına uygun bir reaksiyon mekanizması bulunmuş ve hesaplamalar yapılmıştır.

Doğal gazın büyük bir bölümünü oluşturan metan ve İran, Rusya ve Tekirdağ doğal gazlarının yanması sonucu ortaya çıkan NO_x miktarı, sabit bir reaktant toplam kütlesi ve giriş sıcaklığı için, $\Phi=0.88$ 'de maksimuma ulaşmaktadır. Literatür incelendiğinde, doğal gaz yanmasında NO_x salınımının $\Phi=1$ olması durumunda maksimize olduğu gerçeğiyle birlikte elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %12'lik bir sapmanın olduğu görülmüştür. Bu sapmanın, CREK programının hesap hassasiyetinden ve programın veri dosyasına yazılabilecek reaksiyon tiplerine getirmiş olduğu sınırlamalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ele alınan yakıtların aynı şartlarda yanma sonu NO_x emisyonlarına bakıldığı zaman aralarında gözle görülür bir emisyon farkı olmadığı belirlenmiştir. En yüksek ve en düşük NO_x emisyonlarına sahip metan ve Tekirdağ doğal gazı karşılaştırıldığında %2'lik bir değişim olduğu görülmüştür. Yakıtların yanma sonu NO_x emisyonlarına göre sıralamalarının metan, Rusya, İran ve Tekirdağ doğal gazları şeklinde olduğu görülmektedir. NO_x emisyon seviyesinde gazın metan ve azot içeriği önemli rol oynamaktadır. Yakıtlardaki yüksek metan içeriği reaksiyon sıcaklığını yükseltmekte, bunun sonucu olarak da ısıl NO_x oluşumunu artırmakta olduğu düşünülmektedir. İran gazının metan içeriği Rusya'ninkinden daha yüksek olmasına rağmen Rusya doğal gazının içerdiği azot miktarı nedeniyle yanma sonu NO_x emisyonu daha yüksek çıkmaktadır. Kullandığımız reaksiyon mekanizması sadeleştirme için ani NO_x oluşum reaksiyonlarını içermediğinden dolayı yanma esnasında sadece ısıl ve yakıt kaynaklı NO_x oluşumu olduğunu bilmekteyiz. Ani NO_x oluşumu yakıtça zengin karışım

bölgelerinde etkili olduğundan ve sıcaklıkla birlikte değişim göstermediğinden dolayı bu yolla oluşan NO_x, sonuçlar üzerinde dikkate değer bir değişim yapmayacaktır.

Reaktant toplam kütesinin yanma sonu NO_x miktarını nasıl etkilediğine bakıldığında, EMV değerlerindeki artışla birlikte NO_x miktarlarının da arttığı görülmüştür. NO_x kütle oranlarının ise düşük EMV değerlerinde (<0.1 kg/(m³.s)) dikkate değer bir değişim göstermediği buna karşın yüksek EMV'ler de azaldığı belirlenmiştir (0.01 kg/(m³.s) ile 100 kg/(m³.s) EMV değerleri arasında azalma %10). NO_x oranlarındaki bu düşüşün sebebinin, hem yanma odasına yüksek miktarda giren yakıt-hava kütesinin tümüyle yanmadan, yani yakıt ve havanın bir kısmının reaksiyona girmeden odayı terk etmesine hem de büyük miktarda kütlemin reaksiyon sıcaklığını düşürmesi sonucunda ısıl NO_x oluşumunun azalmasına neden olması olarak düşünülmektedir.

NO_x emisyonu üzerinde reaktant giriş sıcaklığının önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada incelenen yakıtların tümü için, giriş sıcaklığındaki yükselmenin NO_x emisyonlarının artmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Reaktant giriş sıcaklıkları -50 °C ve +50 °C için yanma sonu NO_x kütle oranlarına bakıldığı zaman, yaklaşık olarak %25'lik bir değişim olduğu saptanmıştır. Sistem verimini artırmak amacıyla giriş sıcaklığını yükseltmek istenen bir durum olmasına rağmen, giriş sıcaklığındaki artışa paralel olarak reaksiyon sıcaklığının da yükselmesi ısıl NO_x oluşumunu artırmaktadır. Bu gibi durumlarda yanma esnasında yanma odasının sıcaklığını dolayısıyla reaksiyon sıcaklığını düşürmek için farklı yöntemler uygulanarak NO_x emisyonu azaltılabilmektedir.

Yakma havasının nem oranı artırıldığı zaman tüm yakıtlar için yanma sonu NO_x emisyonlarında düşüş meydana geldiği görülmüştür. Hesaplamalar için yaz aylarında şehirlerimizin kuru ve yaş termometre sıcaklıkları ile nem oranları dikkate alınmıştır. Reaktant giriş sıcaklığı 303 K (tüm şehirlerin yaz aylarındaki sıcaklıklarının ortalama değeri), yakıt/hava eşdeğer oranı 1.0 ve reaktant kütle 0.01 kg/(m³.s) için, hava içindeki nem oranı 0.006, 0.010, 0.014, 0.018 ve 0.022 kg_{sb}/kg_{kh} değerlerinde değiştirilerek emisyonlar incelenmiştir. En düşük ve en yüksek nem oranlarında (0.006 ve 0.022 kg_{sb}/kg_{kh}), yanma sonunda oluşan NO_x miktarlarında ki azalmanın %13 civarında olduğu görülmüştür. NO_x emisyonundaki azalmanın sebebi olarak, yakma havasının içerdiği nem miktarındaki artışın yanma sıcaklığını düşürdüğü dolayısıyla ısıl NO_x oluşumunda azalmaya neden olduğu düşünülmektedir.

Çalışmada kullanılan gazların farklı basınçlar altında yakılması ile NO_x emisyonlarının nasıl bir değişim gösterdiği incelenebilir. Ayrıca çalışma, başka bölgelerden çıkartılan doğal gazların yanma sonu ürünü olarak ortaya çıkan NO_x emisyon miktarlarını bulmak ve reaktant giriş sıcaklığı, kütlesi ve nem oranındaki değişimlerin, NO_x emisyonlarını nasıl etkilediğinin saptanması için genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- Alasfour F N** (1997) NO_x emission from a spark ignition engine using 30% iso-butanol-gasoline blend: part 1-preheating inlet air. *Applied Thermal Engineering*, 5: 245-256.
- Arayıcı S** (1996) Doğal gaz yanmalarında NO_x oluşumu. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği/Doğal gaz Özel Sayısı*, 3 (32): 23-26.
- Arın S ve Akdemir S** (2002) Seralarda doğal gazın ısıtma amacıyla kullanılabilirliği. *Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 3(1): 89-99.
- Cannon S M, Brewster B S and Smoot L D** (1998) Stochastic modeling of CO and NO in premixed methane combustion. *Combustion and Flame*, 113: 135-146.
- Dinca C, Rousseaux P and Badea A** (2006) A life cycle impact of the natural gas used in the energy sector in Romania. *Journal of Cleaner Production*, 15: 1451-1462.
- El-Sherif A S** (1998) Effects of natural gas composition on the nitrogen oxide, flame structure and burning velocity under laminar premixed flame conditions. *Fuel*, 14: 1539-1547.
- EPA** (1999) Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled, Technical Bulletin, Clean Air Technology Center, US Environmental Protection Agency.
- Eyriboyun M** (1997) Endüstriyel Alevlerde İş Oluşumunun İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 105 s.
- Hırkaloğlu F** (2005) Gaz Türbini Yanma Odasında Hidrojen ve Hidrokarbon Yanmasının Modellenmesi ve NO_x Oluşumunun İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 116s.
- Havlucu M Ö** (2003) Metanol Damlasının Detaylı Kimya ile Yanma Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 53s.
- İlbaş M ve Yılmaz İ** (2002) Farklı ısı güçlerindeki kazanlarda yanma ve emisyon davranışının araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1-2): 18-27.
- İTÜ** (2007) *Türkiye'de Enerji ve Geleceği*. İTÜ Görüşü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Javanmardi J, Nasrifar K, Najibi S H and Moshfeghian M** (2006) Feasibility of transporting LNG from South-Pars gas field to potential markets. *Applied Thermal Engineering*, 26: 1812-1819.
- Kadırgan N** (1991) Doğal gazın fiziksel özellikleri yanması, yanma ürünleri ve hava kirliliği. *Endüstride Doğal Gaz Tesisatı ve Dönüşüm Seminer Notları*, TMMOB MMO İstanbul Şubesi, İstanbul, s. 5.
- Küçükali R** (1995) Doğal gazla ısıtma ve çevre ilişkileri. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Mühendis ve Makine/Doğal Gaz Özel Sayısı*, s. 30-33.
- Li S C and Williams F A** (1999) NO_x formation in two-stage methane-air flames. *Combustion and Flame*, 118: 399-414.
- Mendioroz S, Martin-Rojo A B, Rivera F, Martin J C, Bahamonde A and Yates M** (2006) Selective catalytic reduction of NO_x by methane in excess oxygen over Rh based aluminum pillared clays. *Applied Catalysis B: Environmental*, 64: 161-170.
- Özdemir İ B** (2000) Alevsiz yanma teknolojisinin yanma sistemlerinde ortaya çıkan NO_x emisyonlarının azaltılmasında bir yöntem olarak kullanılması. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Mühendis ve Makine Arşivi*, 41 (485): 21-25.
- Pratt D T and Wormeck J J** (1976) CREK: A Computer Program for Calculation of Combustion Reaction Equilibrium in Laminar or Turbulent Flow, Report WSU-ME-TEL-76-1, Washington State Uni.
- Resuloğlu G** (1997) Yanma Esnasında Oluşan Azot Oksitlerin Reaksiyon Kinetiği ile Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, 97s.
- Thomsen D D, Kuligowski F F and Laurendeau N M** (1999) Modeling of NO formation in premixed, high-pressure methane flames. *Combustion And Flame*, 119: 307-318.
- Turbiez A, El Bakali A, Pauwels J F, Rida A and Meunier P** (2003) Experimental study of a low pressure stoichiometric premixed methane, methane/ethane, methane/ethane/propane and synthetic natural gas flames. *Fuel*, 83: 933-941.
- Waibel R** (1997) Low NO_x Burner Applications İn Process Heaters For Refineries and Chemical Plants, John Zick Company, Web, http://www.johnzinc.com/products/burners/pdfs/tp_lonox_burn_apps.pdf, (12.09.1997).
- Yılmaz İ** (2001) Sıvı Yakıtlı Yakma Sistemlerinde Yanma ve Emisyon Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 115 s.
- Yolcu E** (1997) Yanma Gazlarında NO_x Oluşumu Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 83 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Zevenhoven R and Kilpinen P** (2004) Control of pollutants in flue gases and fuel gases, Web, <http://www.abo.fi/~rzevenho/nitroOH2.PDF>, <http://www.hut.fi/~rzevenho/gasbook>, Helsinki University of Technology, (20.01.2004).
- URL-1** (2000) http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/, Mechanical Engineering Department, Berkeley University Of California, February 2000.
- URL-2** (2005) <http://www.iletisim.net/enerji/TermikSantrGazKirl.doc>, Enerji Danışmanlık, 2005.
- URL-3** (2005) <http://www.iklim.cevreorman.gov.tr/raporlar/Envanter.pdf>, Sera Gazları Emisyon Envanteri Çalışma Grubu 2006 Taslak Raporu, Enerji ve Tabii kaynaklar Bakanlığı, Çevre ve Orman Bakanlığı ve Türkiye İstatistik Kurumu Başkanlığı ve Çeşitli Üniversiteler ve Özel Kurumlar, 2005.
- URL-4** (2007) <http://www.meteor.gov.tr>, T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, 18 Ekim 2007.
- URL-5** (2007) <http://www.worldbank.org/html/fpd/em/power/standards/airqstd.stm>, Air Quality Standarts, World Bank, 2007.
- URL-6** (2007) www.cevreorman.gov.tr/belgeler/egzoz.doc, Gaz Yakıtlı Araçlarda Egzos Emisyonu Sınır Değerleri, T.C. Çevre Ve Orman Bakanlığı, 27 Ağustos 2007.
- URL-7** (2007) <http://www.mmoistanbul.org/yayin/Scripts/prodView.asp?idproduct=18>, Modern Yoğuşmalı Kazanlarda Kullanılan Yanma Kontrol Sistemleri, TMMOB Makina Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 18 Ekim 2007.
- URL-8** (1997) <http://homepages.vub.ac.be/~akonnov/>, Detailed reaction mechanism for small hydrocarbons combustion, Release 0.1, 27 August 1997.
- URL-9** (2007) <http://www.saglikvakfi.org/v0/k8a.asp?newsid=241727356&pg=1>, Sağlık Vakfı Online, 16 Kasım 2007.

BİBLİYOGRAFYA

- Çelik C** (1992) Yanma Odalarının Modellenmesi. Doktora Tezi (yayımlanmamış), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 175s.
- Gögüş A Y** (1990) Computer Aided Combustion Modeling For Comprehensive Kinetics And Transport in The Gas Phase. Master Thesis, METU, Ankara, 120s.
- Kuo K K** (1986) Principles of combustion, John Wiley & Sons, Printed In Singapore.
- Miller J A and Bowman C T** (1989) Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, *Prog. Energy and Combust. Sci.*, Vol. 15, pp.287-338.
- Westbrook C K and Dryer F** (1984) Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 10, pp.1-57.

EK AÇIKLAMALAR A
ELEMENT VE TERMODİNAMİK DATALARI

Çizelge A.1 Reaksiyon mekanizmasında kullanılan element ve termodinamik dataları.

ELEMENTS				
C	12.0100	4.		
H	1.00797	1.		
O	16.0000	-2.		
N	14.0080	0.		
THERMO				
N2	N 2.	G	300.000	5000.000
	0.28963194E+01	0.15154863E-02	-0.57235275E-06	0.99807385E-10
	-0.90586182E+03	0.61615143E+01	0.36748257E+01	-0.12081496E-02
	-0.63217520E-09	-0.22577253E-12	-0.10611587E+04	0.23580418E+01
CH2	C 1.H 2.	G	250.00	4000.00
	3.63640785E+00	1.93305663E-03	-1.68701632E-07	-1.00989939E-10
	4.53413398E+04	2.15656066E+00	3.76223707E+00	1.15981908E-03
	8.80083562E-10	-7.33243544E-13	4.53679063E+04	1.71257758E+00
CH2O	C 1.H 2.O 1.	G	300.00	5000.00
	2.99560618E+00	6.68132119E-03	-2.62895469E-06	4.73715289E-10
	-1.53203691E+04	6.91257238E+00	1.65273118E+00	1.26314387E-02
	2.05003143E-08	-8.41323712E-12	-1.48654043E+04	1.37848196E+01
C2H3	C 2.H 3.	G	300.00	5000.00
	5.93346787E+00	4.01774561E-03	-3.96673954E-07	-1.44126655E-10
	3.18543457E+04	-8.53031254E+00	2.45927644E+00	7.37147639E-03
	-1.32164213E-09	-1.18478383E-12	3.33522500E+04	1.15562019E+01
C2H5	C 2.H 5.	G	300.00	5000.00
	7.19048023E+00	6.48407731E-03	-6.42806469E-07	-2.34787939E-10
	1.06745488E+04	-1.47808924E+01	2.69070172E+00	8.71913321E-03
	9.33870314E-10	-3.92777347E-12	1.28704043E+04	1.21381950E+01
C2H6	C 2.H 6.	G	300.00	4000.00
	4.82593823E+00	1.38404286E-02	-4.55725876E-06	6.72496725E-10
	-1.27177930E+04	-5.23950672E+00	1.46253872E+00	1.54946670E-02
	-1.25783188E-08	4.58626713E-12	-1.12391758E+04	1.44322949E+01
O	O 1.	G	300.00	5000.00
	2.54205966E+00	-2.75506191E-05	-3.10280335E-09	4.55106742E-12
	2.92308027E+04	4.92030811E+00	2.94642878E+00	-1.63816649E-03
	-1.60284319E-09	3.89069636E-13	2.91476445E+04	2.96399498E+00
OH	O 1.H 1.	G	300.00	5000.00
	2.88273048E+00	1.01397431E-03	-2.27687707E-07	2.17468370E-11
	3.88688794E+03	5.59571219E+00	3.63726592E+00	1.85091049E-04
	2.38720266E-09	-8.43144185E-13	3.60678174E+03	1.35886049E+00
HO2	H 1.O 2.	G	300.00	5000.00
	4.07219124E+00	2.13129632E-03	-5.30814532E-07	6.11226902E-11
	-1.57972702E+02	3.47602940E+00	2.97996306E+00	4.99669695E-03
	2.35419240E-09	-8.08902424E-13	1.76227387E+02	9.22272396E+00
H	H 1.	G	300.00	5000.00
	2.50000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00
	2.54716270E+04	-4.60117638E-01	2.50000000E+00	0.00000000E+00
	0.00000000E+00	0.00000000E+00	2.54716270E+04	-4.60117608E-01
H2	H 2.	G	300.00	5000.00
	2.99142337E+00	7.00064411E-04	-5.63382869E-08	-9.23157818E-12
	-8.35033997E+02	-1.35511017E+00	3.29812431E+00	8.24944174E-04
	-9.47543433E-11	4.13487224E-13	-1.01252087E+03	-3.29409409E+00
C2H4	C 2.H 4.	G	300.00	5000.00
	3.52841878E+00	1.14851845E-02	-4.41838529E-06	7.84460053E-10
	4.42828857E+03	2.23038912E+00	-8.61487985E-01	2.79616285E-02
	2.78515220E-08	-9.73787891E-12	5.57304590E+03	2.42114868E+01
CH3	C 1.H 3.	G	300.00	5000.00
	2.84405160E+00	6.13797410E-03	-2.23034522E-06	3.78516080E-10
	1.64378086E+04	5.45269728E+00	2.43044281E+00	1.11240987E-02
	1.62182872E-08	-5.86495262E-12	1.64237813E+04	6.78979397E+00
CH4	C 1.H 4.	G	300.00	5000.00
	1.68347883E+00	1.02372356E-02	-3.87512864E-06	6.78558487E-10
	-1.00807871E+04	9.62339497E+00	7.78741479E-01	1.74766835E-02
	3.04970804E-08	-1.22393068E-11	-9.82522852E+03	1.37221947E+01

Çizelge A.1 (devam ediyor)

CO	C	1.O	1.	G	300.00	5000.00	1	
3.02507806E+00	1.44268852E-03	-5.63082779E-07	1.01858133E-10	-6.91095156E-15			2	
-1.42683496E+04	6.10821772E+00	3.26245165E+00	1.51194085E-03	-3.88175522E-06			3	
5.58194424E-09	-2.47495123E-12	-1.43105391E+04	4.84889698E+00				4	
CO2	C	1.O	2.	G	300.00	5000.00	1	
4.45362282E+00	3.14016873E-03	-1.27841054E-06	2.39399667E-10	-1.66903319E-14			2	
-4.89669609E+04	-9.55395877E-01	2.27572465E+00	9.92207229E-03	-1.04091132E-05			3	
6.86668678E-09	-2.11728009E-12	-4.83731406E+04	1.01884880E+01				4	
C2H2	C	2.H	2.	G	300.00	5000.00	1	
4.43677044E+00	5.37603907E-03	-1.91281674E-06	3.28637895E-10	-2.15670953E-14			2	
2.56676641E+04	-2.80033827E+00	2.01356220E+00	1.51904458E-02	-1.61631888E-05			3	
9.07899178E-09	-1.91274600E-12	2.61244434E+04	8.80537796E+00				4	
O2	O	2.		G	300.00	5000.00	1	
3.69757819E+00	6.13519689E-04	-1.25884199E-07	1.77528148E-11	-1.13643531E-15			2	
-1.23393018E+03	3.18916559E+00	3.21293640E+00	1.12748635E-03	-5.75615047E-07			3	
1.31387723E-09	-8.76855392E-13	-1.00524902E+03	6.03473759E+00				4	
H2O	H	2.O	1.	G	300.00	5000.00	1	
2.67214561E+00	3.05629289E-03	-8.73026011E-07	1.20099639E-10	-6.39161787E-15			2	
-2.98992090E+04	6.86281681E+00	3.38684249E+00	3.47498246E-03	-6.35469633E-06			3	
6.96858127E-09	-2.50658847E-12	-3.02081133E+04	2.59023285E+00				4	
CH3O	C	1.H	3.O	1.	G	300.00	3000.00	1
3.77079964E+00	7.87149742E-03	-2.65638391E-06	3.94443145E-10	-2.11261638E-14			2	
1.27832520E+02	2.92957497E+00	2.10620403E+00	7.21659511E-03	5.33847197E-06			3	
-7.37763628E-09	2.07561052E-12	9.78601074E+02	1.31521769E+01				4	
N2O	N	2.O	1.	G	300.00	5000.00	1	
0.47306662E	01	0.28258264E-02	-0.11558104E-05	0.21263681E-09	-0.14564081E-13		2	
0.81617617E	04	-0.17151070E	01	0.26189194E	01	0.86439550E-02	-0.68110612E-05	3
0.22275877E-08	-0.80650276E-13	0.87590078E	04	0.92266951E	01		4	
CHO	C	1.H	1.O	1.	G	300.00	5000.00	1
3.55727124E+00	3.34557286E-03	-1.33500600E-06	2.47057264E-10	-1.71385089E-14			2	
3.91632446E+03	5.55229950E+00	2.89832974E+00	6.19914662E-03	-9.62308423E-06			3	
1.08982494E-08	-4.57488518E-12	4.15992188E+03	8.98361397E+00				4	
N	N	1.		G	300.00	5000.00	1	
0.24502678E	01	0.10661458E-03	-0.74653315E-07	0.18796520E-10	-0.10259837E-14		2	
0.56116035E	05	0.44487572E	01	0.25030699E	01	-0.21800181E-04	0.54205284E-07	3
-0.56475602E-10	0.20999038E-13	0.56098898E	05	0.41675479E	01		4	
NO	N	1.O	1.	G	300.00	5000.00	1	
0.31889992E	01	0.13382279E-02	-0.52899316E-06	0.95919314E-10	-0.64847928E-14		2	
0.98283242E	04	0.67458115E	01	0.40459509E	01	-0.34181783E-02	0.79819174E-05	3
-0.61139254E-08	0.15919072E-11	0.97453867E	04	0.29974976E	01		4	
NO2	N	1.O	2.	G	300.00	5000.00	1	
0.46240759E	01	0.25260330E-02	-0.10609483E-05	0.19879239E-09	-0.13799380E-13		2	
0.22899900E	04	0.13324137E	01	0.34589224E	01	0.20647063E-02	0.66866060E-05	3
-0.95556665E-08	0.36195873E-11	0.28152261E	04	0.83116980E	01		4	

EK AÇIKLAMALAR B

REAKTANT DATALARI

Çizelge B.1 Reaksiyon mekanizmasında kullanılan reaktant dataları. (ER=1, $w=0.022 \text{ kg}_{\text{sb}}/\text{kg}_{\text{kh}}$ için)

A. Metan gazı / hava yanması.

REACTANTS				
C 1.	H 4.	CH4	1.0000 M	G
O 2.		O2	2.0000 M	G
N 2.		N2	7.5200 M	G

B. Rusya-Shebelinka doğal gazı / hava yanması.

REACTANTS				
C 1.	H 4.	CH4	0.9669 M	G
C 2.	H 6.	C2H6	0.0120 M	G
C 1.	O 2.	CO2	0.0031 M	G
N 2.		N2	0.0180 M	G
O 2.		O2	1.9758 M	G
N 2.		N2	7.4290 M	G

C. İran-Güney Pars doğal gazı / hava yanması.

REACTANTS				
C 1.	H 4.	CH4	0.9788 M	G
C 1.	O 2.	CO2	0.0212 M	G
O 2.		O2	1.9576 M	G
N 2.		N2	7.3605 M	G

D. Tekirdağ doğal gazı / hava yanması.

REACTANTS				
C 1.	H 4.	CH4	0.9286 M	G
C 2.	H 6.	C2H6	0.0057 M	G
C 1.	O 2.	CO2	0.0010 M	G
N 2.		N2	0.0647 M	G
O 2.		O2	1.8771 M	G
N 2.		N2	7.0580 M	G

E. Metan gazı / nemli hava yanması.

REACTANTS				
C 1.	H 4.	CH4	1.0000 M	G
O 2.		O2	2.0000 M	G
N 2.		N2	7.5240 M	G
H 2.	O 1.	H2O	0.3369 M	G

Çizelge B.1 (devam ediyor)

F. Rusya-Shebelinka doğal gazı / nemli hava yanması.

REACTANTS				
C 1.	H 4.	CH4	0.9669 M	G
C 2.	H 6.	C2H6	0.0120 M	G
C 1.	O 2.	CO2	0.0031 M	G
N 2.		N2	0.0180 M	G
O 2.		O2	1.9758 M	G
N 2.		N2	7.4290 M	G
H 2.	O 1.	H2O	0.3328 M	G

G. İran-Güney Pars doğal gazı / nemli hava yanması.

REACTANTS				
C 1.	H 4.	CH4	0.9788 M	G
C 1.	O 2.	CO2	0.0212 M	G
O 2.		O2	1.9576 M	G
N 2.		N2	7.3605 M	G
H 2.	O 1.	H2O	0.3297 M	G

H. Tekirdağ doğal gazı / nemli hava yanması.

REACTANTS				
C 1.	H 4.	CH4	0.9286 M	G
C 2.	H 6.	C2H6	0.0057 M	G
C 1.	O 2.	CO2	0.0010 M	G
N 2.		N2	0.0647 M	G
O 2.		O2	1.8771 M	G
N 2.		N2	7.0580 M	G
H 2.	O 1.	H2O	0.3162 M	G

ÖZGEÇMİŞ

Suat ÖZTÜRK 1975’de Almanya’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Zonguldak’da tamamladı. Zonguldak Mehmet Çelikel Lisesi’nden mezun olduktan sonra 1996 yılında Hacettepe Üniversitesi Zonguldak Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’ne girdi. 1996’da bölüm ikincisi olarak mezun olduktan sonra Milli Eğitim Bakanlığı Yurt Dışı Yüksek Lisans sınavını kazanarak University of Florida Electrical and Computer Engineering Department’da mastıra başladı. 2001 yılında mezun olduktan sonra Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Enformatik Bölümü’nde öğretim görevlisi olarak göreve başladı; halen 2006 yılında girdiği ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programını sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Terakki M. 60 Evler S. A 1 K.1
67100 ZONGULDAK

Tel : (372) 257 7880

Faks : -

E-posta: suatozturk@karaelmas.edu.tr