

67852



YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL ALEVLERDE İS OLUŞUMUNUN İNCELENMESİ

Mak. Yük. Müh. Mustafa EYRİBOYUN

F.B.E. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Isı-Proses Programında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN

Prof. Dr. Özgür BOZAT

Ahmet Alp Sığın

İSTANBUL, Ekim 1997

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	iii
SEMBOL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
KISALTMALAR LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY (İNGİLİZCE ÖZET)	xv

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı, Genel Tanımlar ve Yöntem	1
1.2 Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	4

2. YANMA MODELİ VE REAKSİYON MEKANİZMASI

2.1 Termokimyasal Denge	5
2.2 Kinetik Halde Yanma (Sonlu-Hız Kimyası)	9
2.3 CREK'in Tanıtılması	10
2.4 CREK'in Termokimyasal Veri Dosyası	12
2.5 Reaksiyon Mekanizmalarının Oluşturulması ve Denenmesi	13
2.6 Çok Bileşenli Reaktif Sistemler İçin Korunum Denklemleri	20
2.6.1 Tek Boyutlu, Düzlemsel Alevlerde Bileşenler İçin Süreklilik Denkleminin Türetilmesi	20
2.6.2 Tek Boyutlu, Düzlemsel Alevler İçin Enerji Denkleminin Türetilmesi	25
2.7 Ön Karışımli Düzlemsel Bir Alevde Sayısal Çözüm	29
2.7.1 Sonlu Farklar Formülasyonu	30
2.7.2 Sınır Koşulları	32
2.8 Bilgisayar Programı ve Sonuçları	33

3. İS OLUŞUMU

3.1 Giriş	41
3.2 İs Formülasyonu	44
3.3 SOOT Alt Programı ve Sonuçları	46

4. GAZ KARIŞIMLARI İÇİN TAŞINIM BÜYÜKLÜKLERİNİN (TRANSPORT COEFFICIENT) HESAPLANMASI

4.1 Giriş	50
4.2 Matematik Model	51
4.2.1 Isı İletim Katsayısı ve Viskozite Hesabı için Matematiksel Model	52
4.2.2 Diffüzyon Katsayısı Hesabına Ait Matematiksel Model	53
4.3 CONDVISC Alt Programı	54
4.4 DIFFCOEF Alt Programı	56
4.5 Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	57

5.	ŞOK TÜPÜ İLE DENEYSEL ÇALIŞMA	
5.1	Giriş	62
5.2	Deney Düzenekinin Tanıtılması ve Deneylerin Yapılması	64
5.2.1	Deney Setini Oluşturan Cihazlar	64
5.2.2	Deneylerin Yapılması	70
5.3	Şok Dalgası Hızına Bağlı Hesaplamalar	73
5.4	Sinyallerin Filtrelenmesi	74
5.5	Sonuçlar	75
6.	SONUÇLAR	80
EKLER		
Ek-A	Reaksiyon Mekanizması ve data dosyaları	83
Ek-B	CONDVISC . FOR Alt Programı	88
Ek-C	S-TUBE . BAS Programı	93
KAYNAKLAR		107
ÖZGEÇMİŞ		

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Tanımı	Birimi
A	Yüzey alanı	m^2
A_p	Kontrol hacmine taşınım ve difüzyonla, birim zamanda giren toplam kütle miktarı	$kg/(m^3 \cdot s)$
A_w	Kontrol hacmine taşınım ve difüzyonla, birim zamanda, batı (West) yönünde giren kütle	$kg/(m^3 \cdot s)$
A_E	Kontrol hacmine taşınım ve difüzyonla, birim zamanda, doğu (East) yönünde giren kütle	$kg/(m^3 \cdot s)$
C_p	Sabit basınçta molar ısınma ısısı	$J/(kmol \cdot K)$
C_v	Sabit hacimde molar ısınma ısısı	$J/(kmol \cdot K)$
D	Toplam türev operatörü	—
$D_{i,j}$	İkili difüzyon katsayısı	m^2/s
$D_{i,m}$	Karışım difüzyon katsayısı	m^2/s
E	Aktivasyon enerjisi	$J/kmol$
EMV	CREK Bilgisayar programında A_p 'nin karşılığı	$kg/(m^3 \cdot s)$
G_i	i Bileşeninin molar üreme hızı	$kmol_i/(m^3 \cdot s)$
Ma	Mach sayısı	—
NS	Karışım içindeki bileşenlerin toplam sayısı	—
Q	Harici ısı girişi	$W/(m^3 \cdot s)$
R	Gaz sabiti	$J/(kmol \cdot K)$
R_u	Genel gaz sabiti ($R_u=8314.4 J/(kmol \cdot K)$)	$J/(kmol \cdot K)$
R_F	İs oluşum hızı	$g/(cm^3 \cdot s)$
R_{ox}	İs oksidasyonu hızı	$g/(cm^3 \cdot s)$
S	Kaynak terimi	
T	Sıcaklık	K
T^0	Standart referans sıcaklığı (298 K)	K
X_i	i Bileşeninin mol oranı	—
$[X_i]$	i Bileşeninin konsantrasyonu	mol/cm^3
V_i	Kütleli difüzyon hızı	m/s
W	Şok dalgasının hızı	m/s
W	Molekül kütlesi (ağırlığı)	$kg/kmol$

Y_i	i Bileşeninin kütle oranı	—
a	Gaz ortam içinde sesin yayılma hızı	m/s
d	İs taneciğinin çapı	m
f_i	i Bileşeninin birim kütlesi başına dış kuvvetler	N/kg
h	Entalpi	J/kmol
h_f^o	Oluşum entalpisi	J/kmol
k	Reaksiyon hızı	kmol/(m ³ ·s)
l	Şok tüpünde duyargalar arası mesafe	mm
m	Yakıttaki hidrojen atomu sayısı	—
n	Yakıttaki karbon atomu sayısı	—
p	Basınç	N/m ²
q	Kontrol hacmine iletimle, difüzyonla giren ısı miktarı	W/(m ³ ·s)
t	Zaman	s
x	x yönündeki uzay koordinatı (mesafe)	m
v	Hız	m/s

Yunan Sembolleri

Γ	Genel difüzyon terimi	kg/(m·s)
Δt	Zaman farkı	s
Θ	Viskoz gerilmelerden kaynaklanan dissipasyon enerjisi	W/(m ³ ·s)
Φ	Yakıt/Hava eşdeğer oranı	—
ϕ	Genel, bağımsız değişken	—
Ω	Çarpışma integrali	—
γ	Isınma ısıları oranı	—
λ	Isı iletim katsayısı	W/(m·K)
μ	Viskozite	kg/(m·s)
ν, ν	Sırasıyla, reaktantlara ve ürünlere ait stokiometrik mol sayıları	—
ρ	Yoğunluk	kg/m ³
φ	Genelleştirilmiş hal büyüklüğü	—
χ_{ij}	Molekül ağırlıkları ve viskozitelere bağlı bir büyüklük	—
ω_i	i Bileşeninin kütle üreme hızı	kg/(m ³ ·s)

Diğer

∇ Türev operatörü

İndisler

1	Şok tüpünde alçak basınç kısmı
4	Şok tüpünde yüksek basınç kısmı
5	Şok tüpünde yansıyan dalganın ardındaki özellikler
CO_s	Stokiyometrik şartlarda karbon monoksit
CO_{2s}	Stokiyometrik şartlarda karbon dioksit
ady	Adyabatik
b	Reaksiyon hızı ifadesinde geri anlamında
f	Reaksiyon hızı ifadesinde ileri anlamında
f	Yakıt
g	Giriş
i,j,k	Herhangi bir bileşene ait büyüklük
m	Karışıma ait büyüklük

TABLO LİSTESİ

Tablo No	Adı	Sayfa No
Tablo 2.1	Hidrokarbon Yakıtların Oksidasyonu için Kullanılan Detaylı Reaksiyon Mekanizmaları (Bowman, 1986)	14
Tablo 2.2	C_nH_m -Hava (veya N_2 - O_2 karışımları) difüzyon alevleri için genelleştirilmiş hal denklemleri.	15
Tablo 2.3	Korunum denklemlerinin ortak bir formda birleştirilmesi durumunda yeni fonksiyonların karşılıkları.	
Tablo 3.1	Sabit Φ , değişik T_g ve sabit T_g değişik Φ 'ler için adyabatik alev sıcaklıkları (K)	48
Tablo 4-1	Geliştirilen CONDVISC alt programı ile hesaplanan, bazı gazlara ait ısı iletim katsayılarının (λ), değişik sıcaklıklar için, literatürde bulunan değerlerle karşılaştırılması.	58
Tablo 4.2	Bazı üç bileşenli gaz karışımları için ısı iletim katsayılarının CONDVISC alt programı ile hesaplanan değerlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması	59
Tablo 4.3	Gaz çiftlerinin ikili difüzyon katsayısını (D_{ij}) hesaplamak amacıyla geliştirilen DIFFCOEF alt programının verdiği sonuçların deneysel verilerle kıyaslanması.	60
Tablo 5.1	Şok tüpü ile yapılan deneylerde kullanılan basınç, yakıt/oksijen değerleri ile ölçülen ve hesaplanan değerler.	80
Tablo A.1	Metan hava yanması için geliştirilen reaksiyon mekanizmasında ELEMENT, TERMODINAMİK ve REACTANT dataları	84
Tablo A.2	Metan hava yanması için geliştirilen reaksiyon mekanizması ve hız verileri	84
Tablo A.3	TRCOEFF.DAT dosyası	87
Tablo B.1	CONDVISC alt proramının tam listesi	89
Tablo C.1	S-TUBE programının tam listesi	94

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No	Adı	Sayfa No
Şekil 1.1	Teorik yanma modelinin bileşenleri	3
Şekil 2.1	Metan-Hava alevinde sıcaklığın Yakıt/Hava eşdeğer oranına göre değişimi.	16
Şekil 2.2	Metan-Hava alevinde yakıtın kütle oranı-Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.	17
Şekil 2.3	Metan-Hava alevinde O_2 hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.	17
Şekil 2.4	Metan-Hava alevinde CO_2 hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.	18
Şekil 2.5	Metan-Hava alevinde H_2O hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.	18
Şekil 2.6	Metan-Hava alevinde CO hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.	19
Şekil 2.7	Metan-Hava alevinde H_2 hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.	19
Şekil 2.8	Tek boyutlu akım alanı için ayrıklaştırma işleminin gösterilmesi.	30
Şekil 2.9	Stokiometrik metan-hava alevinde OH mol oranı ve sıcaklığın alev boyunca değişimi. (Geliştirilen DUZALEV programının ve reaksiyon mekanizmasının (Tablo A.2) verdiği sonuçlar.)	30
Şekil 2.10	Stokiometrik metan - hava alevinde OH mol oranı ve sıcaklık değişimi. Sürekli çizgiler Coffee'nin 20 bileşenli modeline, kesikli çizgiler Dixon-Levis modeline, noktalar Warnatz modeline ve semboller Bechtel deneylerine ait değerleri göstermektedir. Grafik Coffee'den (1984) aynen alınmıştır.	30
Şekil 2.11	Stokiometrik metan-hava alevinde CO ve H_2 mol oranlarının alev boyunca değişimi. (Geliştirilen DUZALEV programının ve reaksiyon mekanizmasının (Tablo A.2) verdiği sonuçlar.)	37
Şekil 2.12	Stokiometrik metan - hava alevinde CO ve H_2 mol oranı ve sıcaklık değişimi. Sürekli çizgiler Coffee'nin 20 bileşenli modeline, kesikli çizgiler Dixon-Levis modeline, noktalar Warnatz modeline ve semboller Bechtel deneylerine ait değerleri göstermektedir. Grafik Coffee'den (1984) aynen alınmıştır.	37
Şekil 2.13	Stokiometrik metan-hava alevinde O_2 ve CH_4 mol oranlarının alev boyunca değişimi. (Geliştirilen DUZALEV programının ve reaksiyon mekanizmasının (Tablo A.2) verdiği sonuçlar.)	38

Şekil No	Adı	Sayfa No
Şekil 2.14	Stokiyometrik metan - hava alevinde O_2 ve CH_4 mol oranı ve sıcaklık değişimi. Sürekli çizgiler Coffee'nin 20 bileşenli modeline, kesikli çizgiler Dixon-Levis modeline, noktalar Warnatz modeline ve semboller Bechtel deneylerine ait değerleri göstermektedir. Grafik Coffee'den (1984) aynen alınmıştır.	38
Şekil 2.15	Stokiyometrik metan-hava alevinde H_2O ve CO_2 mol oranlarının alev boyunca değişimi. (Geliştirilen DUZALEV programının ve reaksiyon mekanizmasının (Tablo A.2) verdiği sonuçlar.)	39
Şekil 2.16	Stokiyometrik metan - hava alevinde OH mol oranı ve sıcaklık değişimi. Sürekli çizgiler Coffee'nin 20 bileşenli modeline, kesikli çizgiler Dixon-Levis modeline, noktalar Warnatz modeline ve semboller Bechtel deneylerine ait değerleri göstermektedir. Grafik Coffee'den (1984) aynen alınmıştır.	39
Şekil 2.17	Yakıtça zengin ($\Phi=1.25$) önkarişimli metan-hava alevinde CH_4 , CO ve H_2 mol oranlarının alev boyunca değişimi. (DUZALEV programının, Tablo A.2'de verilen reaksiyon mekanizmasıyla verdiği çözüm.)	40
Şekil 2.18	Ön karişimli, laminar yakıtça zengin ($\Phi=1.25$) metan-hava alevi için Jones ve Lindstedt'in (1988) çözümü ve Bechtel et al. deney sonuçları (semboller).	40
Şekil 3.1	Kısmi yanmada C atomu başına oluşum entalpisine göre sıcaklık yükselmesi (Leuckel, 1981).	42
Şekil 3.2	Isı oluşturmaya giden yol (Haynes and Wagner, 1981).	44
Şekil 3.3	Isı oluşumunda yüzey büyümesi ve topaklaşma (coagulation) aşamalarının gösterilmesi (Megaridis and Dobbins, 1989).	44
Şekil 3.4	Önkarişimli, laminar, düzlemsel metan-hava alevinde değişik Yakıt/Hava eşdeğer oranları için ($ER = \Phi$) oluşan net ısı miktarları. ($T_g = 298 \text{ K}$)	47
Şekil 3.5	Önkarişimli, laminar, düzlemsel metan-hava alevlerinde, $\Phi = 1.75$ için değişik gaz (Yakıt+Hava) giriş sıcaklıklarına göre net ısı miktarları.	48
Şekil 3.6	Önkarişimli, laminar düzlemsel bir alevde yakıt (CH_4) ve C_2H_2 mol oranlarının, sıcaklığın alev boyunca değişimi ve ısın ortaya çıkması. ($\Phi = 1.75$ ve gaz giriş sıcaklığı $T_g = 298 \text{ K}$ için)	49
Şekil 4.1	Tipik bir laminar alev boyunca sıcaklık değişiminin, şematik olarak gösterilmesi.	50
Şekil 4.2	İndirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak, çarpışma integralinin değişimini gösteren grafik. (Sürekli çizgiler tablo değerlerinden, kesik çizgiler de eğri uydurma ile elde edilmiştir.)	56

Şekil No	Adı	Sayfa No
Şekil 5.1	Şok tüpünde başlangıç koşulları.	63
Şekil 5.2	Şok tüpünde, diyaframın patlatılmasından sonra oluşan akımlar.	63
Şekil 5.3	Şok tüpü deney düzeneği.	65
Şekil 5.4	Diyafram delme düzeneği.	66
Şekil 5.5	Diyafram tespit flanşları.	66
Şekil 5.6	Deney setinin genel görünümü	67
Şekil 5.7	Diyafram delme sistemi	67
Şekil 5.8	Filtre edilmemiş bir sinyal (Bilgisayar ekranındaki büyütülmüş hali).	68
Şekil 5.9	Filtre edilmiş (3 kHz) bir sinyal.	68
Şekil 5.10	Basınç duyargalarından filtre edilmiş (3 kHz) olarak alınan tipik bir sinyal çifti ve şok dalgasının duyargalar arasında geçirdiği zaman.	74
Şekil 5.11	8 No.lu deneye ait, sinyallerle yapılan işlemler. (a) : Sinyalin hiç filtre edilmemiş (osiloskoptan alınan) hali, (b) : n=16 alınarak filtre edilmiş, (c) : n=8 (İnce çizgi), n=16 (noktalı çizgi) ve n=32 (kalın çizgi) alınarak filtre edilmiş sinyaller üst üste bindirilmiş olarak, (d) : (c)'den büyütülmüş bir kısım.	77
Şekil 5.12	Çalışılan aralıkta, başlangıç basınç oranına (p_4/p_1) bağlı olarak Mach sayısının değişimi.	79

KISALTMALAR LİSTESİ

Kısaltma	Açıklaması
CHEMKIN*	A General-Purpose, Problem-Independent, Transportable, Fortran CHEM ical KIN etics Code Package.
CREK*	A Computer Program for Calculation of Combustion Reaction Equilibrium and Kinetics in Laminar or Turbulent Flow.
JANAF	Joint of Army Navy Air Forces.
DUZALEV**	Düzlemsel Bir Alev İçerisinde, Alev Boyunca Bileşen Konsantrasyonlarındaki Değişimi ve Sıcaklık Dağılımını Hesaplayan Bilgisayar Programı.
CONDVISC**	Gaz Karışımları için Isı İletim Katsayısı ve Viskozite Değerlerini (Thermal Conductivity and Viscosity of Gas Mixture) Hesaplayan Bilgisayar Programı.
DIFFCOEF**	Gaz Karışımları için Isı İkili ve Karışım Difüzyon Katsayılarını Hesaplayan (Binary and Mixture Diffusion Coefficient of Gas Mixture) Bilgisayar Programı.
REACCONT**	Reaksiyon Mekanizması Dosyasındaki Reaksiyonlarda, Her bir Kimyasal Denklemin İki Tarafındaki Atomların Eşit Sayıda Olup Olmadığını Kontrol Eden ve Yazım Hatası Nedeniyle Eşit Olmayan Atom Varsa Bunu Belirten Bilgisayar Programı.
SOOT**	İs (Soot) Hesabı Yapan Bilgisayar Programı.
S-TUBE**	Şok Tüpü Deneylerinde, Dijital Osiloskopun Ayarlanması, Osiloskop Ekranındaki Dalga Formuna ait Bilgilerin Bilgisayara Aktarılması ve Otomatik Olarak Saklanması İşlemlerini Gerçekleştiren Bilgisayar Programı.
EMV	CREK'te kontrol Hacmine Konveksiyon ve Difüzyon Yoluyla Giren Toplam Madde Miktarı
ER	CREK'te Yakıt/Hava Eşdeğer Oranı (Equivalence Ratio).

* : Literatürden.

** : Bu çalışma dahilinde geliştirilmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince yardımını esirgemeyen saygıdeğer hocam, tez danışmanım Prof. Dr. Hasan A. HEPERKAN başta olmak üzere, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde deneysel çalışmalarım için yardımcı olan Prof. Dr. Oğuz BORAT, Prof. Dr. Ekrem EKİNCİ ve Doç. Dr. İbrahim KADI ile Trisonik Laboratuvarı personeline, Z.K.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü Başkanı Prof. Dr. Fahri DAĞLI'ya ve atölye personeline, Y.Müh Akın Y. GÖĞÜŞ'e ve ayrıca doktora çalışmam boyunca maddi ve manevi yardımlarını hiç esirgemeyen Yüksel-Halit ŞAHİN ailesine ve sabırlı eşim Dilek'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa EYRİBOYUN

ÖZET

Yanma olaylarında bir ara ürün olarak beliren isin (kurum) ortaya çıkmasında öncül bir rol oynayan asetilenin (C_2H_2) oluşumu ve is miktarı, metan (CH_4) yanması için incelenmiştir.

Tek boyutlu, laminar, düzlemsel bir alev içerisindeki bileşen konsantrasyonu ve is miktarı dağılımını bulmak için, olayı tanımlayan diferansiyel denklemler, akış alanı boyunca, sonlu farklar yöntemiyle, sayısal olarak çözülmüştür. Reaksiyon mekanizmasını oluşturan elementer reaksiyonlar literatürden bulunmuştur. Bileşenlere ait termokimyasal özelliklerin hesaplanmasında, JANAF tablolarından oluşturulmuş, literatürde verilen, polinom katsayıları kullanılmıştır. Taşınım (transport) büyüklükleri ise, bu amaçla FORTRAN 77 kodunda geliştirilen bir bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır. Burada elde edilen bileşen konsantrasyonlarının dağılımından, asetilene ve diğer hidrokarbonlara ait değerler, is hesabı için kullanılmıştır.

Geliştirilen DUZALEV ve SOOT programlarının birlikte çalıştırılmasıyla, sabit reaktant giriş sıcaklığı ($T_g = 298$ K) için yakıt/hava eşdeğer oranı $\Phi=1.25, 1.5, 1.75, 1.95$ için ve $\Phi=1.75$ sabit değeri için reaktant giriş sıcaklığı $T_g=298$ K, 325 K, 350 K ve 375 K alınarak bileşen konsantrasyonlarının dağılımı ve is miktarları hesaplanmıştır. $\Phi=1.25$ için isin oluşmadığı, buna karşılık Φ büyüdükçe oluşan is miktarının attığı görülmüştür. $\Phi=1.75$ sabit değerinde, reaktant giriş sıcaklığı arttıkça is miktarının azaldığı tesbit edilmiştir.

Alev boyunca sıcaklık, C_2H_2 konsantrasyonu ve is miktarı beraberce incelendiğinde, sonuçların literatürde verilenlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Çalışmada ayrıca propan yanmasını incelemek ve önerilen reaksiyon mekanizmasını deneysel olarak değerlendirebilmek amacıyla bir şok tüpü deney seti kurulmuş ve yansıyan dalganın gerisindeki sıcaklık değeri $T_5=1190$ K – 1450 K arasında değiştirilerek, farklı yakıt/oksijen eşdeğer oranları için deneyler yapılmıştır. Ancak gaz kromatografi cihazından kaynaklanan nedenlerle sağlıklı sonuçlar henüz alınamamıştır.

SUMMARY

Soot appears as an intermediate product in combustion systems. C_2H_2 formation which plays an important role in soot initiation and the related soot yield have been investigated.

In order to determine the species concentration and the soot yield distribution in a one dimensional laminar flat flame, the governing equations have been solved numerically for the flow field using finite differences. The elementary reactions forming the proposed reaction mechanism have been taken from available literature. Polynomial coefficient to calculate the thermochemical properties on the other hand have been calculated using a computer code developed in FORTRAN 77. The results obtained from the calculated distribution of the species concentrations for acetylene and other hydrocarbons have been used to determine the soot yield.

Using the developed DUZALEV and SOOT programs species concentration and the soot yield have been calculated for different equivalence ratios ($\Phi = 1.25, \dots, 1.95$) at a constant entrance temperature ($T_g = 298$ K) and different temperatures ($T_g = 298$ K, $\dots, 375$ K) at a constant equivalence ratio of $\Phi = 1.75$. It has been found that soot does not form for $\Phi = 1.25$ and that it increases with increasing Φ . For $\Phi = 1.75$, it has been determined that the soot yield decreases with increasing reactant entrance temperature.

If the acetylene concentration, flame temperature and the soot yield are considered together, the results show good agreement with literature.

In order to examine propane combustion experimentally and to evaluate the proposed reactions kinetics, a single pulse shock tube system has been designed and manufactured and experiments were performed for different equivalence ratios and varying temperatures ($T_5 = 1190$ K – 1450 K) behind the reflected shock wave. Due to problems encountered in the gas chromatography system, relevant results have not been established so far.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı, Tanımlar ve Yöntem

Ülkemizde enerji ihtiyacı her geçen gün artmakta ve bu ihtiyacın büyük bir bölümü de ithalat yoluyla karşılanmaktadır. 2000 yılı için yapılan tahminlerde, Türkiye’de tüketilen enerjinin %31.7’si kömürden, %33.8’i petrolden, %16.3’ü hidrolik enerjiden, %5.4’ü doğal gazdan, %5’i odundan, %4.2’si jeotermal enerjiden ve geri kalanı da güneş enerjisi ve diğer enerji kaynaklarından elde edilecektir. Doğal gazın da %2.6’sı konutlar, ticari işletmeler ve endüstriyel tesislerde kömür ve petrolü ikame etmek üzere kullanılacaktır (Şanata, 1989). Doğal gaz esas itibariyle metan gazından ibaret olup, içerdiği kükürt miktarının çok az (eser miktarda) olması nedeniyle, büyük kentlerde hava kirliliğinin önlenmesi için ısınma amaçlı yakıt olarak da kullanılmaktadır. Ancak yakıt doğal gaz bile olsa, olumsuz yanma koşulları No_x ve is (kurum) gibi kirleticilerin oluşmasına neden olabilir. Bu çalışmada yakıt olarak metan kullanılması halinde, eksik hava ile yanma koşullarında oluşabilecek is miktarının belirlenmesi üzerinde durulacaktır.

Bir maddenin, ısı ve ışık yayarak oksijenle reaksiyona (tepkimeye) girmesi olayına yanma denilmektedir. Yani yanma bir çeşit kimyasal reaksiyondur. Yanma olayında oksijenle reaksiyona giren madde yakıt, oksijen ise yakıcı durumundadır. Bunların ikisine birden reaktant adı verilir. Reaktantların tepkimesi sonucunda ortaya çıkan kimyasal bileşenlerin tümüne ürün denilmekte olup, ürün; başta karbondioksit (CO_2) ve su buharı (H_2O) olmak üzere, azot oksitleri (NO_x), kükürt dioksit (SO_2), karbon monoksit (CO) vs. gibi gazlardan ibarettir. Ürünün bileşimi; yakıtın cinsi, hava fazlalık katsayısı ve kalma süresi gibi faktörlere bağlıdır (Borat, 1982).

Hidrokarbonlu yakıtların yanmaları sırasında bir ara ürün olarak meydana gelen isin (kurum) oluşumu, diesel motorlarında, gaz türbinlerinde ve çevre kirletici etkisi nedeniyle bacalarda istenmez. Buna karşın endüstriyel fırın ve alevlerde, yanma sonucu açığa çıkan enerjinin büyük bir bölümünün, is parçacıklarının ışıması yoluyla çevreye iletilmesi nedeniyle de arzu edilir. O halde isin, yanma bölgesinde oluşması fakat bacaya ulaşmadan da yanmış olması istenmektedir. Işıma ile transfer olan ısı miktarının belirlenmesinde, yerel (lokal) is konsantrasyonunun ve is parçacıklarının özelliklerinin bilinmesi gerekir. Yerel is konsantrasyonunun bilinmesi ise yanma bölgesinin her noktası için kimyasal kinetik

hesaplarının yapılmasını gerektirir. Literatürde, doğrudan is hesabı yapan bir bilgisayar programına rastlanmamıştır. Ayrıca is oluşumuna, stokiometrinin ve reaktant giriş sıcaklığının etkilerinin bilinmesine de ihtiyaç vardır.

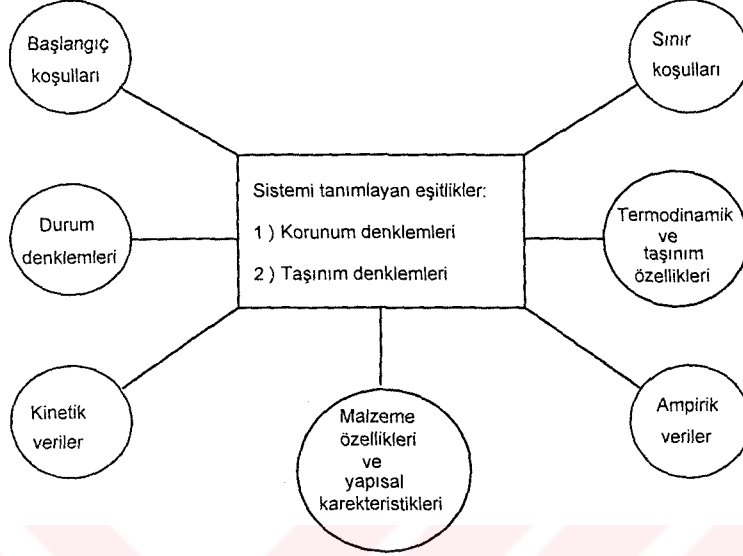
Sunulan çalışmada, metan (CH_4) yanması incelenirken, is oluşumuna öncülük eden bileşenlerin oluşumuna imkan tanıyacak reaksiyon mekanizmalarının kurulması ve bu yakıtların yanması esnasında reaktör boyunca bileşen ve is konsantrasyonlarının dağılımını hesaplayan bir bilgisayar programının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Yanmanın incelenmesi ister deneysel, ister teorik olsun oldukça zordur. Yanmanın gerçekleştiği ortamın sıcaklığının yüksek, reaksiyonların çok hızlı ve reaksiyon bölgesinin birkaç milimetre, bazen de bir milimetrenin altında olması gibi nedenlerle, yanmanın deneysel olarak incelenmesi zordur. Teorik çalışmada ise, öncelikle yanma olayını iyi tanımlayan bir reaksiyon mekanizmasının kurulmasına ihtiyaç vardır. Sonra bu mekanizmadaki herbir reaksiyona ait kinetik verilerin, iyi bir yayın taraması ile bulunması gerekir. Ayrıca bu reaksiyonlardaki her bileşen için termokimyasal verilerin biliniyor olması gerekmektedir. Bütün bu hazırlık safhasından sonra problemi tanımlayan denklemlerin (matematiksel modelin) çözümüne geçilebilir. Dolayısıyla teorik çalışmada sistemi matematiksel olarak tanımlama gereksinimi vardır. Matematiksel modelleme, yalnızca giriş ve çıkış koşullarının tanımlandığı integral yöntemlerden farklı olarak, gözönüne alınan fiziksel büyüklüklerin çözüm alanındaki değişimlerinin de tanımlandığı diferansiyel bir yaklaşımdır (Çelik, 1992).

Matematik modelleme sayesinde, is oluşumuna öncülük eden bileşenlerin konsantrasyonlarının ve diğer fiziksel büyüklüklerin, akış alanı boyunca ne şekilde değiştiklerini bulabiliriz. Kuo, teorik modellemenin komponentlerini Şekil 1.1'deki gibi vermiştir.

Endüstrideki yanma olaylarının çoğunda, sıcaklık 1000 K ile 2500 K arasında değişir ve genellikle yakıtın tam yanması için yeterli oksijen ortamda mevcuttur. Bu şartlar altında oluşan isin toplam miktarı, tüketilen yakıttaki karbon miktarına oranla çok küçüktür. İsin oluşması için geçen süre ise birkaç milisaniye mertebesinde. Bu zaman boyunca yakıt moleküllerinin bir kısmı is taneciklerine sebebiyet verecek dönüşümlere uğrar. Gerçek yanma işlemlerinde, olayı açıklayan kimyasal tepkime denklemi tek bir ifadeden (toplu değişme) ibaret olmayıp, ardarda cereyan eden onlarca reaksiyondan oluşur. Reaksiyon mekanizması deyimi, toplu değişmeğe basamak basamak giden reaksiyonlar sırasını ifade etmek için kullanılır (Sienko and Plane, 1983). Bir tepkime, basamak basamak cereyan ediyorsa bu reaksiyonda

muhtemelen ara ürünler oluşur. Fakat bu ara ürünler bir sonraki reaksiyon adımında harcadıklarından gözlenmeleri oldukça zordur.



Şekil 1.1 Teorik yanma modelin bileşenleri (Kuo, 1986).

“Kimyasal tepkimelerin mekanizmaları, denel olarak belirlenen hız denklemleri ve kısa ömürlü ara tepkimelerin belirlenmesi ile irdelenir. Herhangi bir tepkime mekanizmasının tam olarak aydınlatılması pratikçe olanaksızdır. İleri sürülen mekanizma, yalnızca bilinen tüm gerçeklere dayanan olası varsayımlardır.”, (Erdik ve Sarıkaya, 1985).

Kimyasal kinetik modelleme sayesinde, yanma işlemleri gerçeğe yakın bir şekilde incelenebilmektedir. Kinetik verilerin hızla çoğalması, hızlı ve büyük kapasiteli bilgisayarların geliştirilmiş olması ve stiff denklemlerin etkin çözüm tekniklerinin ortaya çıkarılması, yanma işlemlerinin bilgisayar simülasyonunu kolaylaştırmıştır. Bilgisayar simülasyonlarında, çözüm alanı ızgara şeklinde küçük küçük alanlara bölünür. Sonra bu ızgaranın herbir düğüm noktası için sonlu fark denklemleri yazılır. Böylece, problemi tanımlayan diferansiyel tipteki denklemler, her çözüm noktası için cebrik denklemler haline getirilmiş olur. Sonra da bu denklemler ya matris yöntemiyle yada iteratif yöntemle çözülerek, çözüm alanı boyunca sıcaklık, konsantrasyon gibi büyüklükler hesaplanmış olur. Diferansiyel denklemlerin sayısal çözümünde, başlangıç ve sınır koşullarının bilinmesi gerekmektedir. Verilen herhangi bir sistem için, reaktantların sisteme giriş şartları biliniyordur. Sistem çıkışındaki değerlerin

bilinmesi ise daha zordur. Bu zorluğu aşmak için, çıkışta kimyasal dönüşümlerin tamamen durduğu kabulü yapılır. Ancak Arısoy (1979), bu kabulün de tam olarak doğru olmadığını belirtmektedir. Arısoy'a göre, Örneğin buhar kazanlarında, yanmanın ocakta tamamlandığı, daha sonra hiç bir kimyasal değişme olmadığı kabul edilmektedir. Halbuki katalitik etkisi olan demir yüzeyler üzerinde homojen reaksiyon sıcaklığının çok altında karbonmonoksit ve oksijen molekülleri reaksiyona girmekte ve yanma ürünü olarak karbondioksit vermektedirler. Böylece ocağı terkeden gazların bileşiminde ısıtma yüzeyleri boyunca bir değişme olasılığı belirmektedir. Eğer bu gerçekleşirse baca gazı içerisinde bulunan gazların miktarlarının tesbiti sureti ile ocaktaki yanma olayını değerlendirmek pek doğru olmayacaktır

Bu çalışmada, metanın (CH_4) yanması, denge şartlarında ve kısmi denge (kinetik) şartlarda incelenmiştir. Bu incelemede, özellikle is oluşumuna öncülük eden bileşenlerin oluşum şartları ele alınmıştır. Yanma, ön karışımli, düzlemsel bir alev üzerinde incelenmiştir. Kimyasal bileşenlerin termodinamiksel özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan polinom katsayıları (polinomal fit coefficient), CHEMKIN'den (Kee at al., 1980) ve Göğüş'ten (1990) alınmıştır. Göğüş, bu katsayıları JANAF tablolarından oluşturduğunu ve literatürdeki diğer katsayılardan daha iyi uyum gösterdiğini bildirmektedir. Bileşenlerin konsantrasyonları Fortran-IV bilgisayar programlama dilinde yazılmış, CREK (Pratt and Wormeck, 1976) adlı bir bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır.

Ayrıca propan yanmasını karakterize eden reaksiyon mekanizmalarının sağlıklı kurulabilmesi amacıyla şok tüpü ile deneyler yapılmıştır. Ancak Bölüm 5'de anlatılan nedenlerle bu deneylerden amacımıza uygun sonuçlar alınamamıştır.

1.2 Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında yapılan yayın araştırması iki ana başlık altında toplanabilir: Birinci olarak, yanmada is oluşumu ile ilgili yayınların taranması, ikincisi; reaksiyon kinetiği ile ilgili yayınların araştırılması. Bunların yanında kimyasal reaksiyon içeren akış alanlarının modellenmesi, gaz karışımlarının termodinamiksel özellikleri ve şok tüpü ile ilgili yayınların araştırılması da gerekmiştir. Ancak bütün bu konular aynı zamanda iç-içe girmiş durumdadırlar.

İs oluşumu hakkında yapılmış olan çalışmalar: Bu konuda yapılmış olan çalışmaların oldukça geniş bir özeti Haynes ve Wagner tarafından verilmiştir (Haynes and Wagner, 1981). Leuckel, hidrokarbonların is oluşturma eğilimlerini, karbon atomu başına oluşum entalpisi ve

kısmi yakıt-hava yanması sonucu, sıcaklık yükselmesi ilişkisine bağlı olarak vermektedir (Leuckel, 1984). Leuckel'e göre, C atomu başına oluşum entalpisi arttıkça, yakıtın is oluşturma eğilimi de artmaktadır. Bölüm 3.1'de daha ayrıntılı anlatılacağı gibi; buna göre, is oluşturmaya, asetilen (C_2H_2) en yatkın, metan (CH_4) da en az yatkın yakıtlardır. Daha önce yapılmış olan çalışmalardan anlaşıldığına göre, yakıt molekülünün oksidasyonu ve pirolizi sonucu meydana gelen asetilen (C_2H_2) ve analogları ($C_{2n}H_2$) ile çok halkalı hidrokarbonlar, is oluşumunun ilk aşamalarını oluşturmaktadır (D'alessio at al., 1975; Farmer at al., 1981). Gaz yakıtların yanmasında asetilen, sıvı yakıtların yanmasında ise çok halkalı hidrokarbonlar, is oluşumunu başlatan bileşenler olmaktadır.

İs emisyonu miktarı dört proses yardımıyla tanımlanır; başlama (inception = ortaya çıkma), büyüme (growth), tane bağlanması (agglomeration = coagulation = yığılma = topaklaşma) ve oksidasyon (Homan at al., 1986). Başlangıç aşaması, gaz fazındaki hidrokarbonlardan ilk is taneciğinin ortaya çıkması işlemidir. Büyüme, is taneciğinin yüzeyine gaz fazındaki karbonun eklenmesi ile olur. Yığılma ise tanecik-tanecik çarpışmaları sonucunda, taneciklerin birbirine yapışmasıyla daha büyük taneciklerin oluşması olayıdır. Oksidasyon ise alev sonrası karışım işlemiyle gönderilen oksijenin, is taneciğinden karbonu koparıp uzaklaştırması işlemidir. D'alessio ve arkadaşları, düzlemsel bir alevde, gaz çıkış hızını 7.4 cm/s'de sabit tutarak, CH_4/O_2 değerini 0.9 ... 1.35 arasında değiştirip deneyler yapmışlar ve is tanecik çapının burner ağzından uzaklıkla ve büyüyen CH_4/O_2 oranıyla büyüdüğünü tesbit etmişlerdir (D'alessio at al., 1975). Baumgärtner at al. (1983), yaptıkları deneylerle, yığılma hız sabiti ve kütleli büyüme hız sabitinin yakıt türüne fazlaca bağlı olmadığını gösterdiler. Bu araştırmacılar, şok tüpünde gerçekleştirdikleri deneylerinde yakıt olarak, argon (A) ile seyreltilmiş n-heptan, toluol, piridin ve sikloheksan kullanmışlardır. Ortaya çıkan isin toplam miktarının, incelenen bütün yakıtlarda, karışım içindeki yakıt miktarının artmasıyla arttığını, buna karşılık kullanılan sıcaklık aralığının yükselmesiyle de azaldığını göstermişlerdir.

Olson and Madronich (1985), atmosferik basınçta, önkarişimli laminer toulen ve dekalin alevlerinde is oluşumunu incelemişlerdir. Burada her iki yakıtın is eşik değerinde alev sıcaklığının sabit olduğu (toulen için 1750 K, dekalin için 1720 K) gösterilmiştir. İs hacimsel oranı, çokdalga boyu lazerin sönmesi tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Frenklach ve arkadaşları, asetilen pirolizinde is oluşumu üzerinde başlangıç konsantrasyonu, basınç ve sıcaklığın etkisini detaylı olarak incelemişlerdir (Frenklach at al., 1983). Bu çalışmada deneysel sonuçlarla kinetik mekanizmanın sonuçları arasında bağ kurulmaya çalışılmıştır.

İs oluşumuna değişik bileşenlerin etkilerinin incelendiği çalışmalar da mevcuttur. Örneğin oksijenin (O_2), Saito at al. (1986) metan difüzyon alevinde, Harris (1986) önkarişimli etilen alevinde is oluşumuna etkilerini araştırmışlardır. Harris at al. (1986), önkarişimli alevlerde isin başlangıcına hidroksilin etkisini araştırmıştır. Köylü and Faeth (1991) ve Köylü (1992) karbon monoksit ile is miktarı arasında ilişki kurmuştur. Bu çalışmalarında Köylü, gaz ve sıvı yakıtların alevi üstündeki bölgede CO oluşması ile is emisyonu arasında sıkı bir bağ olduğunu ifade etmektedir. Gülder (1989, 1992, 1993), laminar difüzyon alevlerinde is oluşumuna, yakıtın yapısal bünyesinin, alev sıcaklığının, yükseltilen sıcaklığın ve kükürt dioksitin (SO_2) etkilerini araştırmıştır. Gülder ve Snelling (1993) de azotla seyreltmenin etkisini incelemiştir.

İs oluşumu çalışmalarında şok tüpü ile yapılan deneysel çalışmalar da mevcuttur. Akyüz (1979), şok tüpü içerisinde benzen (C_6H_6) ve toluenin (C_7H_8) pirolizi sırasında is oluşumunu incelemiştir. Akyüz bu çalışmasında, sıcak is taneciklerinin yaydığı kızıl ötesi radyasyonun şiddetindeki değişmeden hareketle, ortamdaki is konsantrasyonu hakkında fikir edinilebileceğini belirtmektedir. 1550 K'in altındaki sıcaklıklarda kızıl ötesi radyasyon şiddetinin kaydedilemediği, 1550 K ile 1800 K arasında ise radyasyon şiddetinin lineer olarak değiştiği, 2200 K'den sonra da yataylaştığı belirtilmektedir. Her iki yakıt için is oluşturma eğilimlerinin birbirine çok benzer olduğu ortaya konmuştur.

Konu ile ilgili çalışmalara Bölüm 3'de ayrıca değinilecektir. Bu çalışmada, isin ticari bir madde olarak üretildiği prosesler dikkate alınmadığından bu konu ile ilgili yayınlar dikkate alınmamıştır.

Reaksiyon mekanizmaları ile ilgili yayınlar: Literatürde hidrokarbonların yanmasına ve pirolizine ait çok sayıda kinetik veri bulmak mümkündür. Ancak bu verilerin kullanılmasında dikkatli olmak gerekmektedir. Özellikle basınç ve birimlere bakılmalıdır. Kinetik veriler; şok tüpü, tek boyutlu reaktör (plug-flow reactor, PFR) ve mükemmel karışimli reaktörler (perfectly stirred reactor, PSR) gibi sistemlerde yapılan deneylerle elde edilebilirler. Genel olarak gaz yakıtlara ait reaksiyon adımları ve bunlara ait kinetik veriler Westbrook and Dryer (1984)'da geniş bir şekilde verilmiştir. Westbrook at al. (1983) ayrıca propan oksidasyonu için de 163 adımlı bir reaksiyon mekanizması vermişlerdir. Miller ve Bowman (1989), tek boyutlu, önkarişimli laminar alev, PSR, ve PFR için üç farklı kinetik çözüm tipini rapor etmişlerdir. Burada gaz yakıtların yanmasıyla beraber azot bileşiklerinin oluşmasına imkan veren reaksiyon adımları da verilmiştir. Bilger at al. (1990) metan-hava yanması için 58 adımlı bir mekanizma vermişlerdir. Jachimowski (1984), topladığı kinetik verilere yenilerini de

katarak, şok tüpü deneylerinin, sayısal simülasyonu için 27 bileşen ve 83 reaksiyon içeren, propan için bir mekanizma oluşturmuştur. Bir boyutlu, laminar önkarişimli asetilen alevinde kimyasal iyonizasyon ve iyon-molekül reaksiyonlarını incelediği çalışmalarında Eraslan ve Brown (1988), 205 reaksiyon için hem ileri hem de geri reaksiyon hızları katsayılarını vermişlerdir. Warnatz (1983), laminar-düzlemsel alev için diferansiyel denklemlerin çözüldüğünü bildirdiği çalışmada etan, metan ve propan için detaylı mekanizmalar vermiştir.

Frenklach and Bornside (1984), şok tüpü ile yaptıkları deneylerde, %9.5 CH₄-%19.0 O₂ ve argon karışımı içine, %0.19, 0.475 ve 0.95 oranlarında C₃H₈ ilave ederek, tüpün iki ayrı yerinde, yansıyan şok dalgası gerisinde, tutuşma gecikmesi süresini ölçmüşlerdir. Yaklaşık sabit yoğunlukta ve 1300–1600 K sıcaklıkları arasında gerçekleştirdikleri deneylerle elde ettikleri sonuçlara uyum gösteren reaksiyon mekanizmalarını, bilgisayarla modelleme yoluyla bulmuşlar ve rapor etmişlerdir. Başlangıçta 34 ayrı bileşen içeren, 140 farklı reaksiyon ile başladıkları modelleme çalışmalarında, duyarlılık analizi sonucunda metan yanması için 22 bileşen içeren, 43 reaksiyon adımından oluşan bir mekanizma vermişlerdir. Deneylerinde kullandıkları şok tüpü paslanmaz çelikten yapılmış olup, alçak basınç tarafı, (yanıcı gaz karışımının konulduğu bölüm, driven section) 7.3 m, yüksek basınçlı gazın konulduğu bölüm (sürücü kısım, driver section) ise 3 m'dir. Diyafram malzemesi olarak da mylar folyo kullanmışlardır.

2. YANMA MODELİ VE REAKSİYON MEKANİZMASI

2.1 Termokimyasal Denge

Kimyasal bir reaksiyon olan yanma olayı iki temel yaklaşımla analiz edilebilir. Bunlar termokimyasal denge veya kısaca denge kabulü ile çözüm ve kinetik çözümlerdir. Denge kabulünde ortamdaki yanabilir her yakıt molekülünün oksijenle buluşup reaksiyona girmesi için gerekli, sonsuz sürenin var olduğu veya reaksiyon hızlarının sonsuz olduğu dolayısıyla yanmanın sonsuz küçük bir zaman aralığında gerçekleştiği kabul edilir. Dolayısıyla denge kabulünde hidrokarbonların stokiometrik halde yanma ürünleri esas itibarıyla CO_2 ve H_2O 'dan oluşmalıdır. Denge çözümündeki kabullerin geçerliliği, uygulamada sınırlıdır. Ancak çok hızlı cereyan eden, hidrojen-oksijen yanması gibi hallerde gerçekçi çözümler verir. Denge çözümleri, yanma olayında ulaşılacak son konumu ifade etmesi bakımından önemlidir. Kinetik halde iteratif çözüm için gerekli olan başlangıç değerlerinin hesabı da denge kabulü ile yapılır.

Denge çözümlerinde, yanma sonrası ürün konsantrasyonlarının hesaplanmasında üç farklı yöntem kullanılabilir (Pratt and Wormeck, 1976): Bunlar, Gibbs fonksiyonunun minimize edilmesi, denge sabiti formülasyonu veya ileri ve geri reaksiyon hızlarını denkleştirilmesi yöntemleridir. Bunlardan ilk ikisi, belirli sıcaklık ve basınçtaki karışım için Gibbs fonksiyonunun minimize edilmesi prensibine dayanır ve *statik denge* olarak bilinir. *Dinamik denge* diyebileceğimiz üçüncü yaklaşım ise tanımı gereğince, sonsuz reaksiyon süresinde, sonlu hız kinetiklerinin sınırlayıcı özelliği nedeniyle pratik kullanımı yoktur. Gibbs fonksiyonunun minimizasyonu yönteminde elementer reaksiyonlar gerekmemektedir.

Birden fazla reaksiyonun aynı anda gerçekleştiği, kompleks kimyasal denge hesaplarında ortaya çıkan, lineer olmayan denklem takımı, iterasyon ile çözülmektedir. Konu ile ilgili detaylı bilgiler Borat (1982) ile Pratt and Wormeck (1976)'de bulunabilir. Bu çalışmada, denge çözümü için Pratt ve Wormeck (1976) tarafından verilen CREK adlı bilgisayar programı kullanılmıştır.

2.2 Kinetik Halde Yanma (Sonlu-Hız Kimyası)

Yanma olayı eş zamanlı olarak cereyan eden bir kimyasal reaksiyonlar bütünüdür. Ardarda gerçekleşen pekçok reaksiyonun bir aşamasında ürün olarak ortaya çıkan bir bileşen, hemen sonra bir başka reaksiyona girerek, farklı bir bileşene dönüşebilir. Gerçekleşen bütün bu reaksiyonlar belirli ve birbirinden farklı hızlara sahiptirler. Bazıları çok hızlı, bazıları ise ihmal edilebilecek kadar yavaşlardır.

Denge, bir anlamda yanma kimyasında ulaşılmak istenen son durum olarak düşünülebilir. Burada sistemin reaktivitesi dikkate alınmadığından, bu son duruma hangi hızla gelindiği bilinmemektedir. Pratikteki yanma olaylarında, gazların yanma hücresindeki kalma süreleri birkaç saniye ile sınırlıdır. Dolayısıyla denge kabulü ile pratik yanma olaylarının incelenmesi mümkün değildir. Burada, zamana bağlı olarak değişimi veren ve kimyasal reaksiyon mekanizmasını içeren reaksiyon kinetiği büyük önem taşımaktadır.

Kimyasal kinetikte gözlenen olayların çoğu *çarpışma teorisi* ile açıklanmıştır. Bu teori, bir kimyasal reaksiyonun olması için taneciklerin çarpışması gerektiğini kabul eder. A ve B gibi iki maddenin reaksiyona girebilmesi için, bu maddeler ister molekül, ister atomlar halinde olsun, çarpışmaları gerekir. Çarpışma esnasında atomlar ve elektronlar yeniden düzenlenir ve kimyasal bağlarla başka türlerin oluşumuna yol açan bir kayma olur (Sienko and Plane, 1983). Bu çarpışmalarda, reaksiyonu gerçekleştirmek için gereken enerjiye *aktifleşme enerjisi* denir.

$$\sum_{i=1}^{NS} \nu_i' W_i \xrightleftharpoons[k_b]{k_f} \sum_{i=1}^{NS} \nu_i'' W_i \quad (2.1)$$

Şeklinde bir genel kimyasal reaksiyon ifadesini ele alalım. Burada, ν' ve ν'' sırasıyla reaktantların ve ürünlerin stokiometrik mol sayılarını, NS bileşen sayısını ve W_i de herhangi bir i bileşenin molekül ağırlığını göstermektedir. 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, buradan net hız ifadesi,

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

olarak yazılabilir. (2.4) eşitliği genelleştirilmiş net hız eşitliği olup, kütle etkisi kanununun genel formunu vermektedir. Burada $[X_i]$ i bileşenin konsantrasyonunu ifade etmektedir, k_f ve k_b de sırasıyla ileri ve geri kimyasal hız sabitleri olup genellikle deneysel olarak ölçülürler. Hız sabiti için amprik 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 katsayıyı, E_a aktivasyon enerjini, T sıcaklığı ve R_u da evrensel gaz sabitini ifade etmektedir. A , sabiti $A=10^a$ olarak da verilmektedir. Buradaki a ise, modifiye edilmiş Arrhenius denkleminde, exponansiyel terimin önündeki 10'un üssü olarak tanımlanır.

Sonlu-hız kimyasına ait reaksiyon denklemleri ve bunlara ait hız katsayıları deneysel olarak belirlenmekte ve sonuçlar çeşitli mekanizmalar halinde sunulmaktadır. Kinetik hal denklemlerinin çözülüp ürün konsantrasyonlarının bulunmasında izlenen prosedür Pratt and Wormeck (1976)'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.3 CREK'in Tanıtılması

Bu çalışmada bir reaktör içindeki, laminar, düzlemsel bir alevde, akış eksenı boyunca bileşen konsantrasyonlarının ne şekilde değiştiğinin hesaplanması gerekmiştir. Bunun için gerekli matematiksel model kurulduğunda karşımıza, bünyesinde lineer olmayan kaynak terimi içeren diferansiyel denklemler çıkmaktadır. Bu diferansiyel denklemlerin sonlu farklar yöntemiyle, iteratif olarak çözülebilmesi için herhangi bir çözüm noktasında (nod) kaynak teriminin de hesaplanması gerekmektedir. Kaynak terimi, bileşen korunumu denkleminde,

kimyasal reaksiyon nedeniyle herhangi bir i bileşeninin oluşum hızı, enerjinin korunumu denkleminde ise reaksiyon entalpisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Kaynak teriminin hesaplanması oldukça zordur. Literatürde bu amaca uygun olarak bulunan bilgisayar programları mevcuttur. Burada bu programlardan biri olan CREK (Pratt and Wormeck, 1976) tanıtılacaktır.

CREK, FORTRAN-IV dilinde yazılmış bir bilgisayar programı olup “*A Computer Program for Calculation of Combustion Reaction Equilibrium and Kinetics in Laminar or Turbulent Flow*” başlığından kısaltılarak isimlendirilmiştir. CREK'in orijinal hali beş alt programdan oluşmaktadır; CREK, CREK0, SPECE, CALC ve HCPS. Ancak başlangıçta bu programı derlemek için kullanılan fortran derleyicisinin, standart fortran dilinde bulunmayan ENTRY deyimini kabul etmeyişi nedeniyle, SPECE alt programı içerisinde bulunan ERATIO bölümü ayrı bir altprogram halinde ayrılmıştır. Böylece alt program sayısı altıya çıkmıştır. CREK'e ait alt programlar, kullanıcı tarafından kendi özel problemine göre yapılan bir ana program tarafından çağırılırlar.

CREK alt programı : Genel çözüm stratejisini kontrol eden alt programdır. Ana program tarafından herhangi bir düğüm noktası için çağrılmakta ve çözüm hücresindeki yakıt/hava oranını hesaplayarak (ERATIO aracılığıyla) denge yada kinetik çözüm işlemine yönlendirmektedir. Ele alınan hücrede kararlı bir çözüm kümesi elde edilememesi durumunda, yakınsamayı hızlandıracak yöntemler uygulamaktadır.

CREK0 alt programı : CREK0 başlatma (*initializing*) alt programıdır. Verilerin bir dosyadan okunmasını ve yüklenmesi işlevlerini yerine getirir. 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 (oluşturan maddeler, mol oranları vs.) okur.

ERATIO alt programı : Elementlerin pozitif veya negatif yüklerinden hareketle, yakıt/hava eşdeğer oranını hesaplar.

SPECE alt programı : Denge ve kinetik haller için Newton-Raphson iterasyonunu oluşturmakta ve her iterasyonda yakınsama parametresini hesap edip, yakınsama koşulunun sağlanıp sağlanmadığını kontrol etmektedir.

CALC alt programı : Denge ve kinetik haller için ayrı ayrı Newton-Raphson düzeltme matrisini oluşturmakta ve bu matrislerin Gauss eliminasyon yöntemi ile çözümünü gerçekleştirmektedir.

HCPS alt programı : Bileşenlerin boyutsuzlaştırılmış termodinamiksel özelliklerini (entalpi, entropi ve özgül ısı), verilen sıcaklık değerinde, polinom uyum katsayılarını kullanarak hesaplar.

2.4 CREK'in Termokimyasal Veri Dosyası

Kullanıcı tarafından oluşturulan ana program ilk olarak CREK0'ı çağırarak, termokimyasal verileri okumalıdır. Bu veri dosyası dört farklı tipte veri içerir:

- 1) Element verileri,
- 2) Termodinamiksel özellik verileri,
- 3) Reaksiyon mekanizması verileri,
- 4) Reaktant verileri.

1) Element verileri : Yanma modelinde bulunan bileşenlerde bulunan elementlere ait sembol, atom ağırlığı ve değerlilik elektronu sayısını içerir.

2) Termodinamiksel özellik verileri : Modeldeki her bir bileşen için, entalpi, entropi ve özgül ısı gibi termodinamiksel büyüklüklerin hesaplanmasını sağlayan katsayılardan oluşmaktadır. Her bir bileşen için dört satırdan ibarettir. İlk satırda, bileşen adı, katsayıların kullanılabileceği sıcaklık aralığı bilgileri bulunur. Bundan sonraki üç satırda 14 tane katsayı vardır. Bu katsayılar aşağıdaki formüllere göre, bileşenlerin termodinamiksel özelliklerinin hesaplanmasında kullanılır. Bunların ilk 7'si 1000-5000 K arasında, son 7'si de 300-1000 K arasında geçerlidir. Denklemlerde C_p ısınma ısısını, R_u evrensel gaz sabitini, h entalpiyi T sıcaklığı ve z 'ler de polinom uyum katsayılarını ifade etmektedir.

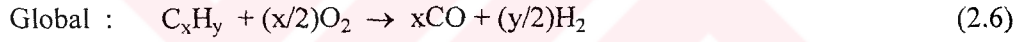
$$\frac{C_p}{R_u} = z_1 + z_2 T + z_3 T^2 + z_4 T^3 + z_5 T^4 \quad (2.6)$$

$$\frac{h}{R_u T} = z_1 + \frac{z_2 T}{2} + \frac{z_3 T^2}{3} + \frac{z_4 T^3}{4} + \frac{z_5 T^4}{5} + \frac{z_6}{T} \quad (2.7)$$

$$\frac{s^0}{R_u} = z_1 \log T + z_2 T + \frac{z_3 T^2}{2} + \frac{z_4 T^3}{3} + \frac{z_5 T^4}{4} + z_7 \quad (2.8)$$

Bu formüllerle hesaplanan büyüklüğün birimi R_u 'nın birimine bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan element ve termodinamiksel veri tabanı Tablo A.1'de verilmiştir. Tablo A.1'de verilmemiş olmasına rağmen bu konuda geniş bir veri bankası elimizde mevcuttur.

3) Kinetik veriler : Reaksiyon mekanizmasındaki elementer reaksiyonların açık yazılışları ve bunlara ait hız katsayılarını içerir. CREK yalnız gaz fazındaki reaksiyonları kabul eder ve bu reaksiyonlar aşağıdaki verilen reaksiyon tiplerinden (mode) birine uymak zorundadır:



4) Reaktant verileri : Modelde kullanılan reaktantlara ait semboller ve mol oranlarını içerir. Yanma hücresine birden fazla yakıt, karışım veya hava girişi olabilir. Bunlar, başlarına REACTANTS-1, REACTANTS-2, vs. gibi satırlar eklenerek tanımlanabilirler.

2.5 Reaksiyon Mekanizmalarının Oluşturulması ve Denenmesi

Daha önce yapılmış olan çalışmalarda kullanılan reaksiyon mekanizmalarındaki reaksiyon sayısı ve sahip oldukları bileşen sayıları çok çeşitli olmakla beraber, Bowman (1986), reaksiyon içeren kompleks akış olayları için kimyasal kinetik modelleri incelediği araştırmasında, değişik araştırmacıların kullandıkları mekanizmalardaki reaksiyon sayısı ve bileşen sayılarını bir tablo halinde vermiştir (Tablo 2.1). Hemen her araştırmacının işaret ettiği

gibi bu tablodaki sayılar mutlak anlamda bir şey ifade etmemektedir. Gerçek bir yanma olayında gerçekleşen reaksiyon adımlarını tam anlamıyla bilmek veya herhangi bir yakıt için her çeşit aleve uyan genel bir reaksiyon mekanizması bulmak çok zordur.

Tablo 2.1 Hidrokarbon Yakıtların Oksidasyonu için Kullanılan Detaylı Reaksiyon Mekanizmaları (Bowman, 1986)

<i>Yakıt</i>	<i>Bileşen Sayısı</i>	<i>Reaksiyon Sayısı</i>
H ₂ /CO	12	27
CH ₄	23	58
C ₂ H ₆	31	84
C ₃ H ₈	41	163
C ₄ H ₁₀	47	238
C ₈ H ₁₈	62	350
C ₂ H ₄	30	109
C ₃ H ₆	41	163
C ₂ H ₂	26	100
CH ₃ OH	26	84

İs oluşumu için yanma esnasında asetilen oluşması gerektiğinden, kurulacak olan reaksiyon mekanizmalarında asetilene ait elementer reaksiyonların bulunması gerekmektedir. Bu amaca uygun reaksiyon mekanizmalarını literatüreden bulmak mümkünse de CREK'in elementer reaksiyon tiplerine getirmiş olduğu sınırlama bunların doğrudan kullanılmasına engel oluşturmuştur. Bu nedenle çalışmamızın başlarında, metan yanmasında kullanılmak üzere bir reaksiyon mekanizması oluşturulmuştu (Eyriboyun ve Heperkan, 1993). Bunun için değişik araştırmacıların yayınlarından yararlanılmıştır. 21 bileşen içeren, 79 elementer reaksiyonlu bu mekanizma, denge ve kinetik halde denenmiş ve bulunan konsantrasyon değerleri ve sıcaklıklar literatürdeki deneysel çalışmaların sonuçlarıyla O₂ hariç yeterli derecede uyumlu olduğu görülmüştür. O₂ için elde edilen sonuçlarda, yakıt/hava eşdeğer oranının 1'den büyük değerleri için belirgin bir sapma vardır. Diğer bileşenler için de genel olarak şunlar söylenebilir: Her bileşen için kinetik çözüm, denge çözümüne göre daha iyi uyum sağlamaktadır. Yine her bileşen için, stokiometrik şartlara yakın durumlarda çözümler deneysel değerler yeterli uyumu göstermektedir. Yanma ile ilgili literatürde karşılaşılan pek çok çalışmada, birbirinden çok farklı değerlerle karşılaşılabilmektedir. Bunun nedeni de yanmanın henüz tam anlamıyla çözülememiş bir konu olmasına bağlanabilir.

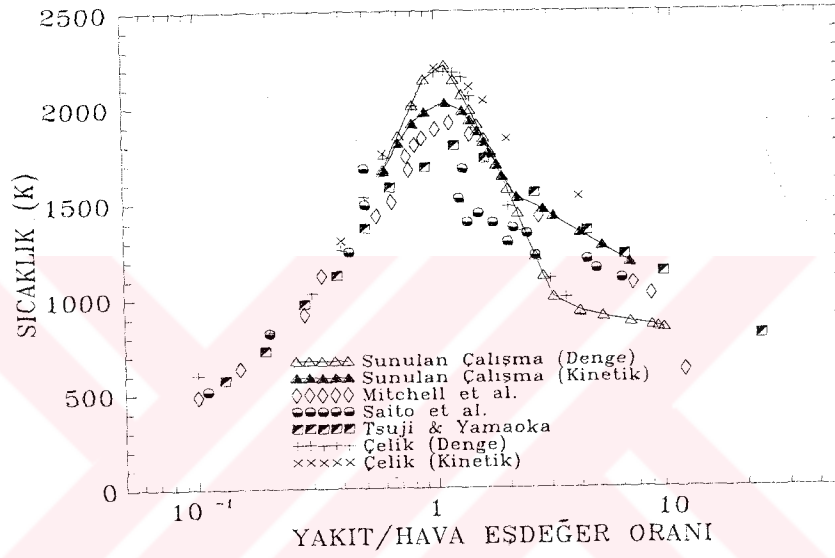
Karşılaştırma, Sivathanu ve Faeth (1990) tarafından geliştirilmiş olan, kütle oranı için genelleştirilmiş hal denklemleri (Tablo 2.2) kullanılarak O_2 , CO_2 , H_2O , CO ve H_2 , için yapılmıştır (Şekil 2.2'den 2.7'ye kadar).

Bu reaksiyon mekanizması, Yakıt/Hava eşdeğer oranının (Φ) geniş bir aralığında ($0.4 < \Phi < 7.0$) denenmiştir. Hesaplamalar, Φ 'nin değeri, $0.4 < \Phi < 2.0$ arasında 0.1, $2.0 < \Phi < 4.0$ arasında 0.5 ve $\Phi > 4.0$ için de 1.0 artımlarla yapılmıştır. Reaktant giriş sıcaklığı bütün hesaplamalar için 300 K alınmıştır. Φ 'nin bazı değerleri için yakınsama sağlanamamıştır. Φ 'ye bağlı olarak bulunan sıcaklık değerleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Sivathanu ve Faeth'in (1990) çalışmalarında, yakıt için genelleştirilmiş hal denklemi olarak doğrudan yakıtın kütleli oranının alınabileceği bildirilmektedir.

Tablo 2.2 C_nH_m -Hava (veya N_2 - O_2 karışımları) difüzyon alevleri için genelleştirilmiş hal denklemleri.

Bileşen	$\psi(Y_i)$
Yakıt (CH_4)	Y_i
O_2	$\left(\frac{32n + 8m + W_f Y_{O_{2\infty}}}{32n + 8m + W_f Y_{O_2}} \right) \left(\frac{Y_{O_2}}{Y_{O_{2\infty}}} \right)$
CO_2	$\left(\frac{44n - W_f Y_{CO_{2s}}}{44n - W_f Y_{CO_2}} \right) \left(\frac{Y_{CO_2}}{Y_{CO_{2s}}} \right)$
H_2O	$\left(\frac{9m - W_f Y_{H_2O_s}}{9m - W_f Y_{H_2O}} \right) \left(\frac{Y_{H_2O}}{Y_{H_2O_s}} \right)$
CO	$\left(\frac{44n - M_f Y_{CO_{2s}}}{44n - M_f Y_{CO}} \right) \left(\frac{Y_{CO}}{Y_{CO_{2s}}} \right)$
H_2	$\left(\frac{9m - W_f Y_{H_2O_s}}{9m - W_f Y_{H_2}} \right) \left(\frac{Y_{H_2}}{Y_{H_2O_s}} \right)$

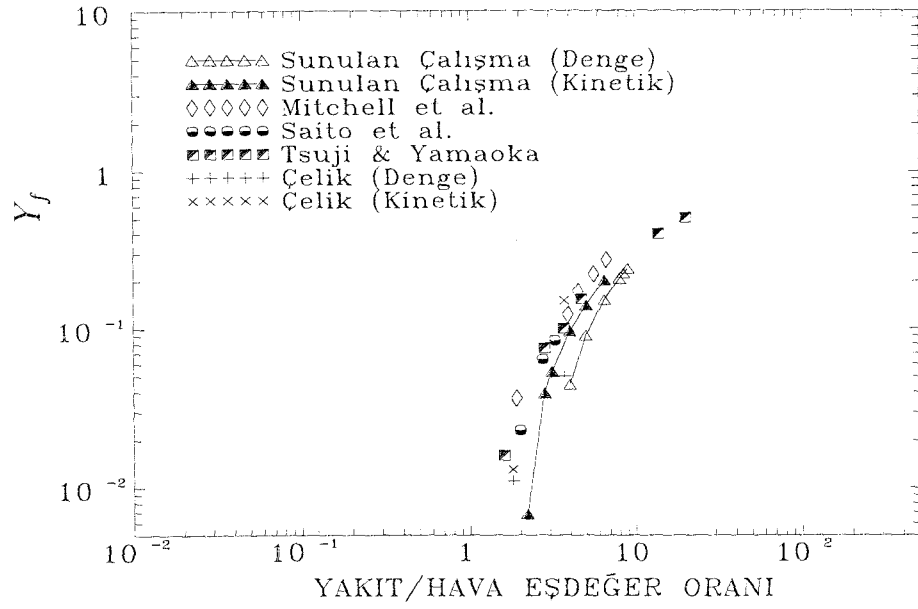
Burada, $\psi(Y_i)$, i bileşeninin kütle oranı (Y_i) için genelleştirilmiş hal büyüklüğünü, W_f yakıtın molekül ağırlığını, s indisi stokiometrik şartlardaki değeri, ∞ indisi çevre havasına ait değeri, n yakıttaki karbon atomu ve m de yakıttaki hidrojen atomu sayısını ifade etmektedir. Stokiometrik durumda CO_2 'in kütleli oranı, denge halinde $Y_{\text{CO}_2\infty} = 0.137$, kinetik halde ise $Y_{\text{CO}_2\infty} = 0.114$ olarak hesaplanmıştır. Kinetik hesaplamada $\text{EMV} = 0.1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \text{ s})$ olarak alınmıştır. Burada EMV, yanma hücresine difüzyon ve konvektif yolla giren toplam kütle miktarını göstermektedir.



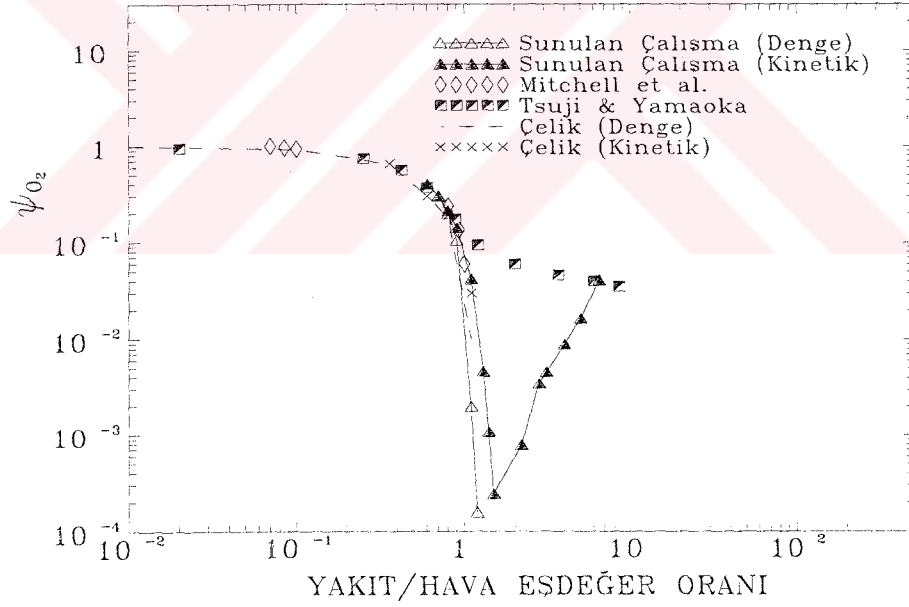
Şekil 2.1 Metan-Hava alevinde sıcaklığın Yakıt/Hava eşdeğer oranına göre değişimi.

Sivathanu ve Faeth'in verdiği genelleştirilmiş hal denklemleri difüzyon alevleri için verilmiştir. Sunulan bu çalışmada daha sonra ön karışımli düzlemsel alevlerde bileşen dağılımının bulunması aşamasına gelindiğinde kurulan mekanizmanın uygun olmadığı görülerek yeni bir reaksiyon mekanizması oluşturma yoluna gidilmiştir.

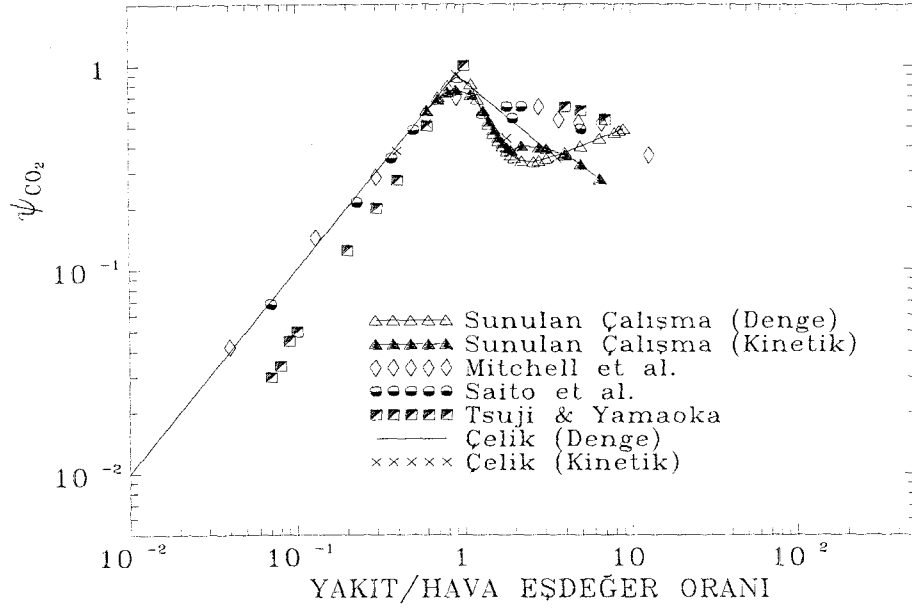
Şekil 2.1'den 2.7'ye kadar olan grafiklerin içindeki Mitchell et. al., Saito et. al. ve Tsuji and Yamaoka'ya ait değerler Sivathanu ve Faeth (1990)'de yer alan grafiklerden okuma yapılarak elde edilmişlerdir. Çelik'e ait değerlerden CO dışındakiler Çelik (1992)'den, CO için olan değerler ise Çelik (1993)'den alınmışlardır.



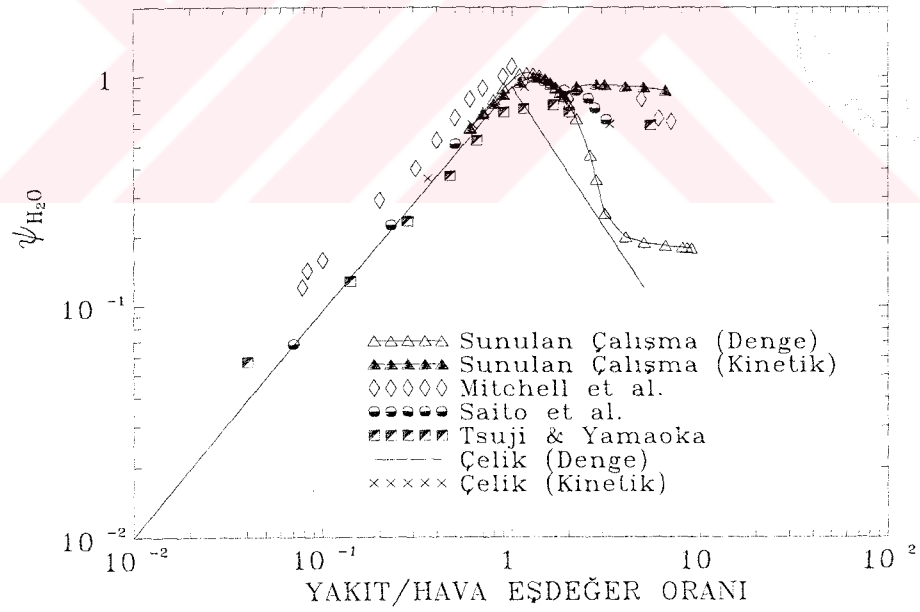
Şekil 2.2 Metan-Hava alevinde yakıtın kütle oranı-Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.



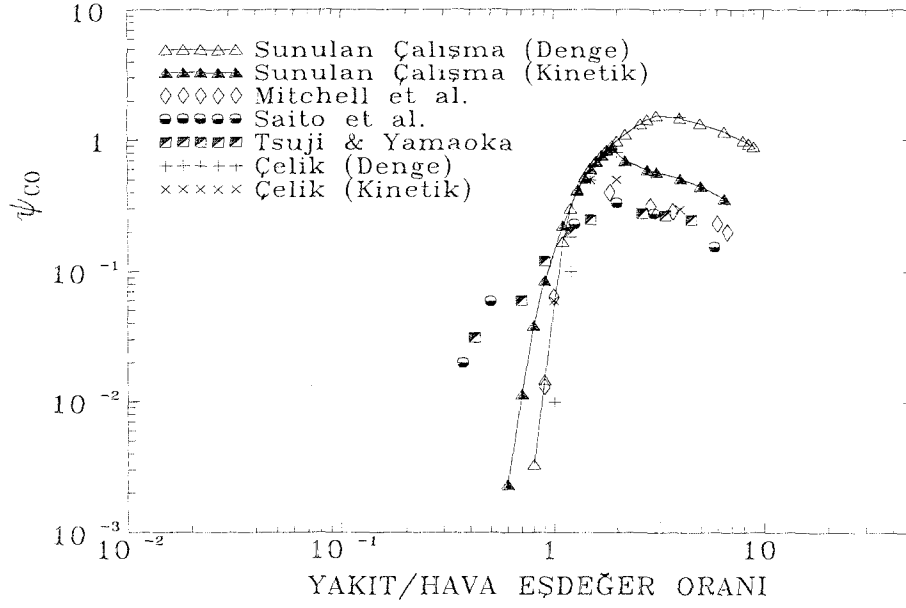
Şekil 2.3 Metan-Hava alevinde O₂ hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.



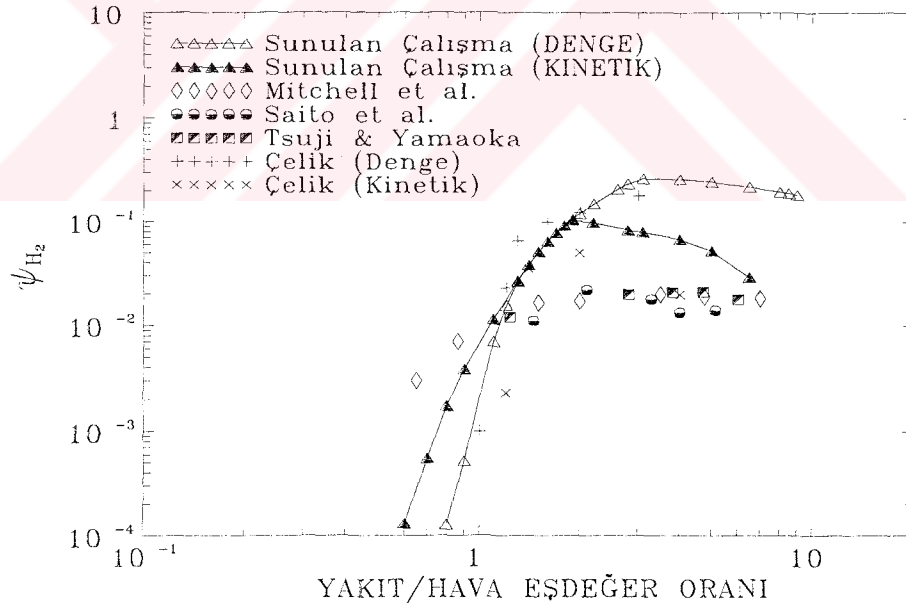
Şekil 2.4 Metan-Hava alevinde CO_2 hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.



Şekil 2.5 Metan-Hava alevinde H_2O hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.



Şekil 2.6 Metan-Hava alevinde CO hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.



Şekil 2.7 Metan-Hava alevinde H₂ hal büyüklüğü Yakıt/Hava eşdeğer oranı ilişkisi.

2.6 Çok Bileşenli Reaktif Sistemler İçin Korunum Denklemleri

Çok bileşenli reaktif gaz karışımlarına ait korunum denklemleri en genel haliyle aşağıda verildiği gibidir (Kuo,1986).

Kütle için süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2.10)$$

Herhangi bir i Bileşeni için süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla Y_i + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{V}_i = \frac{\omega_i}{\rho} \quad i = 1, 2, \dots, NS \quad (2.11)$$

Enerjinin korunumu denklemi,

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{Dp}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + \Theta + Q' + \rho \sum_{i=1}^{NS} Y_i \mathbf{f}_i \cdot \mathbf{V}_i \quad (2.12)$$

Bu denklemlerde, ρ yoğunluğu, t zamanı, $\mathbf{v}$ hızı, Y_i i bileşeninin kütle oranını, $\mathbf{V}_i$ kütle difüzyon hızını, ω_i i bileşeninin kütle üreme hızını, h entalpiyi, p basıncı, $\mathbf{D}$ toplam türev operatörünü, ∇ türev operatörünü, $\mathbf{q}$ kontrol hacmine iletimle, difüzyonla ve Dufour etkisiyle giren ısı miktarını, Θ viskoz gerilmelerden kaynaklanan dissipasyon enerjisini, Q' harici ısı girişini, $\mathbf{f}_i$ i bileşeninin birim kütlesi başına dış kuvvetleri ve NS de karışım içindeki bileşenlerin toplam sayısını ifade etmektedirler.

2.6.1 Tek Boyutlu, Düzlemsel Alevlerde Bileşenler İçin Süreklilik

Denkleminin Türetilmesi

Çok bileşenli reaktif sistemler için korunum denklemleri, en genel haliyle oldukça karmaşık olup, çözüm için belirli kabullerin yapılmasını gerektirirler. Tek boyutlu, düzlemsel, düşük Mach sayılı, laminar ve kararlı hal şartları altında aşağıdaki kabullerin de yapılması halinde korunum denklemlerini yeniden yazalım.

Kabuller:

- a) Dış kuvvetler ihmal ediliyor,
- b) Soret ve Dufour etkileri ihmal ediliyor,
- c) Harici ısı ilavesi yok,
- d) Viskoz etkiler ihmal ediliyor,
- e) Basınç gradyanı yaklaşık sıfıra eşit (Dolayısıyla momentum denklemi gerekmez),

Bu kabullerin ışığı altında korunum denklemleri:

Süreklilik denklemi (kütlenin korunumu),

$$\frac{d}{dx}(\rho u) = 0 \quad \Rightarrow \quad (\rho u) = \text{SABİT} \quad (2.13)$$

Herhangi bir i bileşeni için süreklilik denklemi,

$$u \frac{dY_i}{dx} = \frac{\omega_i}{\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{1}{dx} (\rho Y_i V_i) \quad (2.14)$$

Enerjinin korunumu denklemi,

$$\rho u \frac{dh}{dx} = - \frac{dq}{dx} \quad (2.15)$$

q 'nın değeri de,

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} + \rho \sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i V_i \quad (2.16)$$

olup burada λ ısı iletim katsayısını, h_i de i bileşeninin özgül entalpisini ifade etmektedir. Belirli bir T sıcaklığında h_i için,

$$h_i = h_{f,i}^0 + \int_{T^0}^T C_{p,i} dT \quad (2.17)$$

ifadesi geçerlidir.

Basınç gradyanı sıfır kabul edildiğine göre yoğunluğu sabit düşünebiliriz. Buna göre (2.14) denklemi,

$$u \frac{dY_i}{dx} = \frac{\omega_i}{\rho} - \frac{1}{dx} (Y_i \mathbf{V}_i) \quad (2.18)$$

olur. $\mathbf{V}_i$ hızından kurtulmak için çok bileşenli difüzyon eşitliği kullanılabilir.

$$\frac{dX_i}{dx} = \sum_{j=1}^{NS} \frac{X_i X_j}{D_{ij}} (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i) \quad (2.19)$$

$$X_i = \frac{Y_i / W_i}{\sum_{j=1}^{NS} (Y_j / W_j)} \quad j = 1, 2, \dots, NS \quad (2.20)$$

Bütün bileşen çiftleri için ikili (binary) difüzyon katsayıları birbirine eşit kabul edilirse (2.19) denklemi,

$$\begin{aligned} D \frac{dX_i}{dx} &= \sum_{j=1}^{NS} X_i X_j (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i) \\ &= X_i \sum_{j=1}^{NS} X_j \mathbf{V}_j - X_i \mathbf{V}_i \end{aligned} \quad (2.21)$$

Bulunan en son eşitlikte her terim Y_i / X_i ile çarpılır ve i üzerinde toplanırsa,

$$\sum_{i=1}^{NS} \frac{Y_i}{X_i} D \frac{dX_i}{dx} = \sum_{i=1}^{NS} Y_i \sum_{j=1}^{NS} X_j \mathbf{V}_j - \sum_{i=1}^{NS} Y_i \mathbf{V}_i \quad (2.22)$$

$$\sum_{i=1}^{NS} Y_i = 1, \quad \sum_{i=1}^{NS} X_i = 1 \quad \text{ve} \quad \sum_{i=1}^{NS} Y_i \mathbf{V}_i = 0 \quad (2.23)$$

oldukları dikkate alınır,

$$\sum_{j=1}^{NS} X_j \mathbf{V}_j = \sum_{i=1}^{NS} Y_i D \frac{d}{dx} \ln X_i = \sum_{j=1}^{NS} Y_j D \frac{d}{dx} \ln X_j \quad (2.24)$$

bulunur.

(2.24) eşitliği (2.21)'de yerine konulur ve her terim X_i ' ye bölünürse,

$$D \frac{1}{X_i} \frac{dX_i}{dx} = \sum_{j=1}^{NS} Y_j D \frac{d}{dx} \ln X_j - \mathbf{V}_i \quad (2.25)$$

ve buradan da,

$$-\mathbf{V}_i = D \left(\frac{d}{dx} \ln X_i - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln X_j \right) \quad i = 1, 2, \dots, NS \quad (2.26)$$

(2.26) denkleminde X_i yerine, (2.20) ile verilen karşılığı konularak işlemlere devam edersek,

$$\begin{aligned} -\mathbf{V}_i &= D \left[\frac{d}{dx} \ln \left(\frac{Y_i/W_i}{\sum_{j=1}^{NS} Y_j/W_j} \right) - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln X_j \right] \\ -\mathbf{V}_i &= D \left[\frac{d}{dx} \ln(Y_i/W_i) - \frac{d}{dx} \ln \left(\sum_{j=1}^{NS} Y_j/W_j \right) - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln X_j \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

Aynı işlem tarzı, (2.27) denklemindeki X_j için de türetilebilir,

$$\begin{aligned} -\mathbf{V}_i &= D \left[\frac{d}{dx} \ln(Y_i/W_i) - \frac{d}{dx} \ln \left(\sum_{j=1}^{NS} Y_j/W_j \right) - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln \left(\frac{Y_j/W_j}{\sum_{k=1}^{NS} Y_k/W_k} \right) \right] \\ -\mathbf{V}_i &= D \left[\frac{d}{dx} \ln(Y_i/W_i) - \frac{d}{dx} \ln \left(\sum_{j=1}^{NS} Y_j/W_j \right) - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln(Y_j/W_j) - \sum_{k=1}^{NS} Y_j \ln \left(\sum_{k=1}^{NS} Y_k/W_k \right) \right] \end{aligned} \quad (2.28)$$

(2.23) denklemindeki ilk terim dikkate alınır, (2.28) denkleminin sağ tarafındaki köşeli parantez içindeki, ikinci ve dördüncü terimler birbirlerini götürür. Buradan hareketle aşağıdaki işlemler gerçekleştirilebilir:

$$\begin{aligned}
-\mathbf{V}_i &= D \left[\frac{d}{dx} \ln(Y_i/W_i) - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln(Y_j/W_j) \right] \\
-\mathbf{V}_i &= D \left[\frac{d}{dx} \ln Y_i - \frac{d}{dx} \ln \left(\frac{1}{W_i} \right) - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln Y_j + \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln \left(\frac{1}{W_j} \right) \right]
\end{aligned} \tag{2.29}$$

(2.29) denkleminde,

$$\frac{d}{dx} \ln \left(\frac{1}{W_i} \right) = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{d}{dx} \ln \left(\frac{1}{W_j} \right) = 0$$

olması nedeniyle, bu denklemi yeniden yazabiliriz,

$$-\mathbf{V}_i = D \left(\frac{d}{dx} \ln Y_i - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{d}{dx} \ln Y_j \right)$$

Burada, parantez içindeki ikinci terimde $\ln Y_j$ 'nin türevi yerine yazılırsa,

$$-\mathbf{V}_i = D \left(\frac{d}{dx} \ln Y_i - \sum_{j=1}^{NS} Y_j \frac{1}{Y_j} \frac{dY_j}{dx} \right)$$

elde edilir. Bu denklemde, Y_j 'ler sadeleştirilip, türev, toplam işaretinin dışına alınırsa, parantez içindeki ikinci terimin sıfır olacağı görülür. Sonuç olarak kütleli difüzyon hızı, $\mathbf{V}_i$ yerine,

$$\mathbf{V}_i = -D \frac{d}{dx} \ln Y_i \quad i = 1, 2, \dots, NS \tag{2.30}$$

olarak, Fick yasasının matematiksel ifadesine gelinmiş olur. (2.30) denklemiyle elde edilmiş olan $\mathbf{V}_i$ ifadesi (2.18) denkleminde yerine konulursa,

$$u \frac{dY_i}{dx} = \frac{\omega_i}{\rho} - \frac{1}{dx} \left[Y_i \left(-D \frac{1}{Y_i} \frac{dY_i}{dx} \right) \right]$$

$$u \frac{dY_i}{dx} = \frac{\omega_i}{\rho} + D \frac{1}{dx} \left(\frac{dY_i}{dx} \right)$$

$$u \frac{dY_i}{dx} - D \frac{d^2 Y_i}{dx^2} = \frac{\omega_i}{\rho} \quad (2.31)$$

olarak bileşen korunumu denklemi elde edilmiş olur.

2.6.2 Tek Boyutlu, Düzlemsel Alevler İçin Enerji Denkleminin Türetilmesi

Yukarıda yapılmış olan kabullerin ışığı altında, enerji denklemi en son (2.15)'teki haliyle ifade edilmişti. Bu denklemi yeniden yazalım

$$\rho u \frac{dh}{dx} = -\frac{dq}{dx} \quad (2.32)$$

Burada h yerine,

$$h = \sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i \quad (2.33)$$

ve q 'nun yerine de (2.16) denklemiyle verilen karşılığını yazılırsa,

$$\rho u \frac{d}{dx} \sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i = -\frac{d}{dx} \left(-\lambda \frac{dT}{dx} + \rho \sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i V_i \right)$$

$$\rho u \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} + \sum_{i=1}^{NS} Y_i \frac{dh_i}{dx} \right) = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - \rho \frac{d}{dx} \sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i V_i$$

V_i yerine (2.30) eşitliği konulursa,

$$\rho u \sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} + \rho u \sum_{i=1}^{NS} Y_i \frac{dh_i}{dx} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - \rho \frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i \left(-D \frac{d}{dx} \ln Y_i \right) \right]$$

$$\rho u \sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} + \rho u \sum_{i=1}^{NS} Y_i \frac{dh_i}{dx} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \rho D \frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i \frac{1}{Y_i} \frac{dY_i}{dx} \right]$$

$$\begin{aligned} \rho u \sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} + \rho u \sum_{i=1}^{NS} Y_i \frac{dh_i}{dx} &= \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \rho D \left(\sum_{i=1}^{NS} \frac{dh_i}{dx} \frac{dY_i}{dx} \right) + \rho D \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{d^2 Y_i}{dx^2} \right) \\ \rho \left[\sum_{i=1}^{NS} h_i \left(u \frac{dY_i}{dx} - D \frac{d^2 Y_i}{dx^2} \right) \right] + \rho u \sum_{i=1}^{NS} Y_i \frac{dh_i}{dx} - \rho D \left(\sum_{i=1}^{NS} \frac{dh_i}{dx} \frac{dY_i}{dx} \right) &= \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Buradaki $u \frac{dY_i}{dx} - D \frac{d^2 Y_i}{dx^2}$ terimi daha önce $\frac{\omega_i}{\rho}$ olarak bulunmuştu (Denklem (2.31)). Bu durum dikkate alınır ve ayrıca (2.34) denklemindeki ikinci ve üçüncü terimler aşağıda verildiği gibi açılırlarsa;

$$\rho u \sum_{i=1}^{NS} Y_i \frac{dh_i}{dx} = \rho u \frac{d}{dx} \sum_{i=1}^{NS} Y_i h_i - \rho u \sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx}$$

ve

$$-\rho D \left(\sum_{i=1}^{NS} \frac{dh_i}{dx} \frac{dY_i}{dx} \right) = -\rho D \frac{d}{dx} \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} \right) + \rho D \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{d^2 Y_i}{dx^2} \right)$$

Bu son iki açılım (2.34) denkleminde taşınırsa,

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{NS} h_i \omega_i + \rho u \frac{d}{dx} \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i \right) - \rho u \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} \right) - \rho D \frac{d}{dx} \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} \right) \\ + \rho D \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{d^2 Y_i}{dx^2} \right) = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \end{aligned} \quad (2.35)$$

bulunur.

(2.35) denkleminde de (2.34) denkleminde benzer düzenlemeler yapılırsa,

$$\sum_{i=1}^{NS} h_i \omega_i + \rho u \frac{d}{dx} \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i \right) - \rho \sum_{i=1}^{NS} h_i \left(u \frac{dY_i}{dx} - D \frac{d^2 Y_i}{dx^2} \right) - \rho D \frac{d}{dx} \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} \right) = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2}$$

Burada eşitliğin sol tarafındaki birinci ve üçüncü terim birbirlerini götürür ve dolayısıyla,

$$\rho u \frac{d}{dx} \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i Y_i \right) - \rho D \frac{d}{dx} \left(\sum_{i=1}^{NS} h_i \frac{dY_i}{dx} \right) = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (2.36)$$

elde edilir. Ancak (2.36) denklemi bu haliyle kullanışlı değildir. Burada Y_i 'den kurtulmak gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için aşağıdaki işlemler yapılabilir.

(2.17) Denklemiyle verilmiş olan h_i 'nin karşılığı, (2.36) denkleminde yerinde konulursa,

$$\rho u \frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^{NS} \left(h_{f,i}^0 + \int_{T^0}^T C_{p,i} dT \right) Y_i \right] - \rho D \frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^{NS} \left(h_{f,i}^0 + \int_{T^0}^T C_{p,i} dT \right) \frac{dY_i}{dx} \right] = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2}$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{d}{dx} \sum_{i=1}^{NS} \left(h_{f,i}^0 Y_i \right) + \rho u \frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^{NS} Y_i \left(\int_{T^0}^T C_{p,i} dT \right) \right] - \rho D \frac{d}{dx} \sum_{i=1}^{NS} h_{f,i}^0 \frac{dY_i}{dx} \\ - \rho D \frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^{NS} \frac{dY_i}{dx} \left(\int_{T^0}^T C_{p,i} dT \right) \right] = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho \sum_{i=1}^{NS} h_{f,i}^0 \left(u \frac{dY_i}{dx} - D \frac{d^2 Y_i}{dx^2} \right) + \rho u \frac{d}{dx} \sum_{i=1}^{NS} Y_i \left(\int_{T^0}^T C_{p,i} dT \right) \\ - \rho D \frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^{NS} \frac{dY_i}{dx} \left(\int_{T^0}^T C_{p,i} dT \right) \right] = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \end{aligned}$$

(2.31) denklemi ve $\sum_{i=1}^{NS} Y_i C_{p,i} = C_p$ olduğu dikkate alınır,

$$\sum_{i=1}^{NS} h_{f,i}^0 \omega_i + \rho u \frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT - \rho D \frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^{NS} \frac{dY_i}{dx} \left(\int_{T^0}^T C_{p,i} dT \right) \right] = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (2.37)$$

(2.37) Denklemindeki köşeli parantezin içindeki terim aşağıdaki şekilde açılabilir,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT &= \frac{d}{dx} \sum_{i=1}^{NS} Y_i \left(\int_{T^0}^T C_{p,i} dT \right) \\ &= \sum_{i=1}^{NS} \left(\frac{dY_i}{dx} \right) \int_{T^0}^T C_{p,i} (T^*) dT^* + \sum_{i=1}^{NS} Y_i \frac{d}{dx} \left(\int_{T^0}^T C_{p,i} (T^*) dT^* \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^{NS} \left(\frac{dY_i}{dx} \right) \int_{T^0}^T C_{p,i} dT + \sum_{i=1}^{NS} Y_i C_{p,i}(T) \frac{dT}{dx} \\
&= \sum_{i=1}^{NS} \left(\frac{dY_i}{dx} \right) \int_{T^0}^T C_{p,i} dT + C_p \frac{dT}{dx}
\end{aligned}$$

Buradan,

$$\sum_{i=1}^{NS} \left(\frac{dY_i}{dx} \right) \int_{T^0}^T C_{p,i} dT = \frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT - C_p \frac{dT}{dx} \quad (2.38)$$

(2.38) denklemi, (2.37)'de yerine konulursa,

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{NS} h_{f,i}^0 \omega_i + \rho u \frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT - \rho D \frac{d}{dx} \left(\frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT \right) + \rho D \frac{d}{dx} C_p \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} \\
&\rho u \frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT - \rho D \frac{d}{dx} \left(\frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT \right) + \rho D C_p \frac{d^2 T}{dx^2} - \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = - \sum_{i=1}^{NS} h_{f,i}^0 \omega_i \quad (2.39)
\end{aligned}$$

Enerji yayınıminin, kütle yayınımina oranı olarak tanımlanmış olan Lewis sayısı 1'e eşit alınırsa,

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{\lambda}{\rho C_p D} = \quad (2.40)$$

yazılır ve buradan $(\rho C_p D) = \lambda$ elde edilir. Dolayısıyla (2.39) denklemindeki üçüncü ve dördüncü terimlerin toplamı sıfır olur. Sonuç olarak,

$$\rho u \frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT - \rho D \frac{d}{dx} \left(\frac{d}{dx} \int_{T^0}^T C_p dT \right) = - \sum_{i=1}^{NS} h_{f,i}^0 \omega_i \quad (2.41)$$

şeklinde, enerji denklemi bulunmuş olur.

2.7 Ön Karışımli Düzlemsel Bir Alevde Sayısal Çözüm

Bölüm 2.6'da, çok bileşenli reaktif sistemler için korunum denklemleri, tek boyutlu, düzlemsel, düşük Mach sayılı, laminar ve kararlı hal şartları altında ve yapılan diğer kabullerle, aşağıdaki şekilde elde edilmişlerdi.

Süreklilik denklemi (2.13):

$$(\rho u) = \text{SABİT}$$

Kütlesel debinin tanımından,

$$\rho u = m \quad (2.42)$$

yazılabilir.

Herhangi bir i bileşeni için süreklilik denklemi (2.31):

$$\rho u \frac{dY_i}{dx} - \rho D \frac{d}{dx} \left(\frac{dY_i}{dx} \right) = \omega_i$$

Enerjinin korunumu denklemi (2.41):

$$\rho u \frac{d}{dx} \int_{T_0}^T C_p dT - \rho D \frac{d}{dx} \left(\frac{d}{dx} \int_{T_0}^T C_p dT \right) = - \sum_{i=1}^{NS} h_{f,i}^0 \omega_i$$

(2.31) ve (2.41) denklemlerinin incelenmesinden, bu iki denklemin benzer yapıda olduğu görülebilir. Dolayısıyla bu iki denklemi benzer formda ifade etmek mümkündür.

ϕ Genel anlamda bağımlı bir değişkeni, Γ genel difüzyon terimi ve S de kaynak terimini göstermek üzere, bileşen ve enerji denklemleri aşağıdaki şekilde, tek bir gösterimle ifade edilebilir:

$$m \frac{d\phi}{dx} - \Gamma \frac{d}{dx} \left(\frac{d\phi}{dx} \right) = S \quad (2.43)$$

Bu denklem,

$$\Gamma \frac{d^2 \phi}{dx^2} - m \frac{d\phi}{dx} - S = 0 \quad (2.44)$$

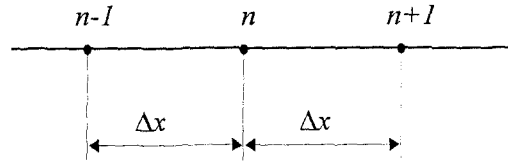
olarak ikinci dereceden parabolik bir diferansiyel denklemdir. Alev içindeki bileşen konsantrasyonlarının ve sıcaklığın mesafeye bağlı olarak değişimi, bu denklemi sonlu farklar cinsinden ifade edilip, iteratif olarak çözmek suretiyle bulunabilir. Yeni halde denklemdeki sembollerin ifade ettikleri büyüklükler topluca Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3 Korunum denklemlerinin ortak bir formda birleştirilmesi durumunda yeni fonksiyonların karşılıkları.

	ϕ	Γ	S
Bileşen denklemi	Y_i	$\frac{\lambda}{C_p} = \rho D$	ω_i
Enerji denklemi	$\int_{T_0} C_p dT$	$\frac{\lambda}{C_p} = \rho D$	$-\sum_{i=1}^{NS} h_{f,i}^0 \omega_i$

2.7.1 Sonlu Farklar Formülasyonu

Tek boyutlu akım olayları için çözüm alanı, akış eksenini boyunca eşit aralıklarla ayrıtık çözüm noktaları şeklinde tanımlanabilir (Şekil 2.8). Bu çözüm noktaları için diferansiyel denklemler sonlu farklar cinsinden yazılırsa, birer cebrik denklem takımı elde edilir. Bu cebrik denklem takımı da iteratif yolla veya matris yöntemiyle çözülebilir.



Şekil 2.8 Tek boyutlu akım alanı için ayrıklaştırma işleminin gösterilmesi.

Herhangi bir n çözüm noktası için (2.44) denklemini sonlu farklar cinsinden ifade edecek olursak;

$$\Gamma \frac{\phi^{n+1} - 2\phi^n + \phi^{n-1}}{(\Delta x)^2} - m \frac{\phi^{n+1} - \phi^{n-1}}{2(\Delta x)} + S = 0 \quad (2.45)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenirse,

$$\left(\frac{2\Gamma}{(\Delta x)^2} \right)^n \phi_i^n = \left(\frac{\Gamma}{(\Delta x)^2} - \frac{m}{2(\Delta x)} \right)^{n+1} \phi_i^{n+1} + \left(\frac{\Gamma}{(\Delta x)^2} + \frac{m}{2(\Delta x)} \right)^{n-1} \phi_i^{n-1} + S \quad (2.46)$$

olur.

CREK, kendisini çağıran programda, bileşen korunumu denkleminin,

$$AN \cdot S2(I), N = AE \cdot S2(I) + AW \cdot S2(I) + SO(S2(I)) \quad I=1, NS \quad (2.47)$$

formunda, enerji denkleminin de,

$$AN \cdot H, N = AE \cdot H, E + AW \cdot H, W + SO(H) \quad (2.48)$$

formunda tanımlanmış olmasını istemektedir. Burada $AN=AW+AE$ $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ olarak N noduna (çözüm noktasına), komşu noktalardan ($W=$ West, burada $n-1$; $E=$ East, burada $n+1$) konveksiyon ve difüzyonla giren kütle miktarını ifade etmektedir. $S2(I)$ kmol/kg olarak mol sayısını ifade etmektedir. $SO(S(I))$, kmol/kg olarak kimyasal reaksiyon nedeniyle ortaya çıkan i bileşeninin miktarını vermektedir. Aynı şekilde enerji denkleminde de, H ilgili çözüm noktasındaki karışım entalpisini, $SO(H)$ da kontrol hacmine kinetik yolla ve radyasyonla giren ısı miktarını ifade etmektedir.

Bu bilgilerin ışığı altında (2.46) denklemi, bileşen için G_i , $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ olarak, mol bazında üreme miktarını vermek üzere, $\omega_i = G_i W_i$ yazılarak ve bu da kaynak terimi S ile yer değiştirilerek,

$$\left(\frac{2\rho D}{(\Delta x)^2} \right)^n \frac{Y_i^n}{W_i} = \left(\frac{\rho D}{(\Delta x)^2} - \frac{\rho u}{2(\Delta x)} \right)^{n+1} \frac{Y_i^{n+1}}{W_i} + \left(\frac{\rho D}{(\Delta x)^2} + \frac{\rho u}{2(\Delta x)} \right)^{n-1} \frac{Y_i^{n-1}}{W_i} + G_i \quad (2.49)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir.

Kimyasal büyüklüklerin dönüşüm formüllerinden, $\frac{Y_i}{W_i} = \frac{[X_i]}{\rho}$ olduğu bilinmektedir. Bu eşitlik (2.49) denklemine taşınırsa,

$$\left(\frac{2\rho D}{(\Delta x)^2}\right)^n \frac{[X_i^n]}{\rho} = \left(\frac{\rho D}{(\Delta x)^2} - \frac{\rho u}{2(\Delta x)}\right)^{n+1} \frac{[X_i^{n+1}]}{\rho} + \left(\frac{\rho D}{(\Delta x)^2} + \frac{\rho u}{2(\Delta x)}\right)^{n-1} \frac{[X_i^{n-1}]}{\rho} + G_i \quad (2.50)$$

elde edilir. $Le=1$ alındığı hatırlanırsa, bu eşitlik aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$\left(\frac{2\lambda}{C_p(\Delta x)^2}\right)^n \frac{[X_i^n]}{\rho} = \left(\frac{\lambda}{C_p(\Delta x)^2} - \frac{\rho u}{2(\Delta x)}\right)^{n+1} \frac{[X_i^{n+1}]}{\rho} + \left(\frac{\lambda}{C_p(\Delta x)^2} + \frac{\rho u}{2(\Delta x)}\right)^{n-1} \frac{[X_i^{n-1}]}{\rho} + G_i \quad \dots (2.51)$$

(2.51) Denklemindeki $\frac{[X_i]}{\rho}$ terimi kmol_i/kg olarak i bileşenine ait konsantrasyonu ifade etmektedir ve CREK bilgisayar programının istediği şekle uygundur. Benzer işlemler enerji denklemi için de yapılarak, bileşen ve enerjinin korunumu denklemleri CREK ile çözülebilir şekle dönüştürülmüş olmaktadır.

2.7.2 Sınır Koşulları

(2.51) Denkleminin sayısal olarak çözülebilmesi için, Şekil 2.8’de verilen ağ (grid) sistemini alev öncesi ve sonrasına uzayacak şekilde uzun tutmak gerekmektedir. Herbir çözüm noktasına başlangıçta rastgele değerler verilir ve her bir nokta için denklem yazılırsa, karşımıza üçlü-köşegen lineer denklem sistemi çıkar. Problem böylece lineer denklem takımının çözümü şekline indirgenmiş olur. Çözüm noktalarının her iki ucu için sıcaklık (T) ve kütle oranı (Y_i) sınır şartları yardımıyla tanımlanır. Serbestçe yayılan bir alev için koordinat sistemi, sıcaklık ve kütle oranının değişiminin (gradyanının) durduğu, soğuk gaz bölgesine doğru genişletilebilir. Sıcak gaz bölgesinde ise sıcaklık ve kütle oranının değişiminin sabit kaldığı kabul edilebilir (Warnatz, 1983; Brown and Eraslan, 1988; Eraslan and Brown, 1988).

$$Y_{i,c} = Y_{i,u} ; \quad T_c = T_u \quad (2.52)$$

$$\left(\frac{dY_i}{dx}\right)_h = SABİT \quad ; \quad \left(\frac{dT}{dx}\right)_h = SABİT \quad (2.53)$$

Yazılabilir. Burada c indisi soğuk (cold), u yanmamış (unburnt), h da sıcak (hot) bölgeye ait değerleri ifade etmektedir.

Coffee (1984), düzlem alev için reaksiyon mekanizması geliştirdiği çalışmasında, Fristrom et al.'ın (Coffee, 1984'de anılmakta) deneysel çalışmalarında elde ettikleri sıcaklık dağılımını kullanmıştır. Zaman üzerindeki integrasyonlarını, yine aynı deneylerden bilinen CH_2O konsantrasyonunun pik değerini tuturuncaya kadar devam ettirmişlerdir.

2.8 Bilgisayar Programı ve Sonuçları

(2.31) Denklemleriyle verilen bileşen korunumu ve (2.41) enerjinin korunumu denklemlerini, (2.52) ve (2.53) ile verilen sınır şartlarını da dikkate alarak çözen bir bilgisayar programı (DUZALEV), çalışmamız dahilinde geliştirilmiştir. Fortran-77 dilinde geliştirilen bu bilgisayar programı, CREK ile uyumlu olarak çalışmaktadır. (2.50) veya (2.51) Denklemlerinden görüldüğü gibi herhangi bir çözüm noktası için ya karışım difüzyon katsayısının (D) yada ısı iletim katsayısı (λ) ve ısınma ısısının (C_p) hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada her ikisi de denenmiş ve ikinci durumda (2.51 denkleminde) karar kılınmıştır.

Geliştirilen bilgisayar programının algoritması şu şekildedir:

- Basınç, sıcaklık, akış hızı gibi değerler doğrudan okutulur. Ayrıca herbir çözüm noktasına başlangıç değerleri atanır (sıcaklık, mol oranı ve kütle oranı vs.) Mol sayısı, mol oranı ve kütle oranlarının başlangıç değerleri için CREK0 ve CREK alt programları kullanılır.
- Çözüm noktasındaki karışım özellikleri ve sıcaklıktan hareketle ısı iletim katsayısı (λ) hesaplanır. λ Hesabı için bu çalışma dahilinde geliştirilen CONDVISC alt programı (Bölüm 4.2) kullanılır.
- Çözüm noktası için ısınma ısısı (C_p) hesaplanır. C_p 'nin hesaplanması için CREK'in alt programlarından biri olan HCPS kullanılır.

- Bu hesaplamaların ardından,

$$AE = \left(\frac{\lambda}{C_p(\Delta x)^2} - \frac{\rho u}{2(\Delta x)} \right)^{n+1} \quad \text{ve} \quad AW = \left(\frac{\lambda}{C_p(\Delta x)^2} + \frac{\rho u}{2(\Delta x)} \right)^{n-1}$$

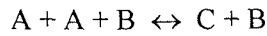
olarak hesaplanır.

- Bunların toplamı $AN = AW + AE$, CREK'e EMV değeri olarak verilir.
- (2.48) Denklemi uyarınca önce (H,W) ve (H,E) yani $h^{(n-1)}$ ve $h^{(n+1)}$ hesaplanarak (H,N) ($h^{(n)}$) bulunur.

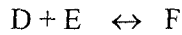
• Tüm bu bilgilerle beraber, bir önceki iterasyonda elde edilen mol sayıları, yeni çözüm için giriş mol sayıları olarak CREK'e verilerek o çözüm noktasına ait yeni mol sayıları ve CREK'in enerji denkleminin çözümünden elde ettiği sıcaklık değeri bulunmuş olur.

- Bu işleme, her bir çözüm noktası için ve sınır şartları sağlanıncaya kadar devam edilir.

Geliştirilen bilgisayar programı ile değişik araştırmacıların verdikleri reaksiyon mekanizmaları denenmiştir. Sonuçlar bazı bileşenler dışında deneysel verilere ve literatürde bulunan teorik çalışmaların sonuçlarına kısmen uyumludur. Bazı bileşenlerin mol oranları dağılımlarındaki uyumsuzluğun nedeni tam olarak anlaşılamamıştır. Bu uyumsuzluk, korunum denklemlerinin analitik çözümü sırasında yapılan kabüllerden veya yanma esnasında ortaya çıkan bazı bileşenlerin (radikallerin) ısı iletim katsayısı veya difüzyon katsayılarının doğru olarak hesaplanamıyor oluşundan kaynaklanabilir. Ayrıca, Bölüm 2.5'de değinildiği üzere CREK'in elementer reaksiyon tiplerini sınırlamış olması da sonuçlar üzerinde etkili olmaktadır. Çünkü literatürde bulunan pekçok mekanizma,



veya



türünden reaksiyonlar içermektedir. Ancak CREK bu tip reaksiyonların kullanımına imkan vermemektedir.

Aşağıda bazı sonuçlardan örnekler verilmiştir. Şekil 2.9'dan, Şekil 2.16'ya kadar, stokiometrik metan-hava alevi için DUZALEV programının verdiği sonuçlar, Coffee

(1984)'den alınan grafiklerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bilgisayarla yapılan denemeler, Coffee (1984) ile daha rahat karşılaştırma yapabilmek amacıyla onunla aynı şartlarda yapılmıştır. Buna göre, basınç 1 atm, gazların giriş sıcaklığı 298 K, giriş hızı 5 cm/s alınmıştır.

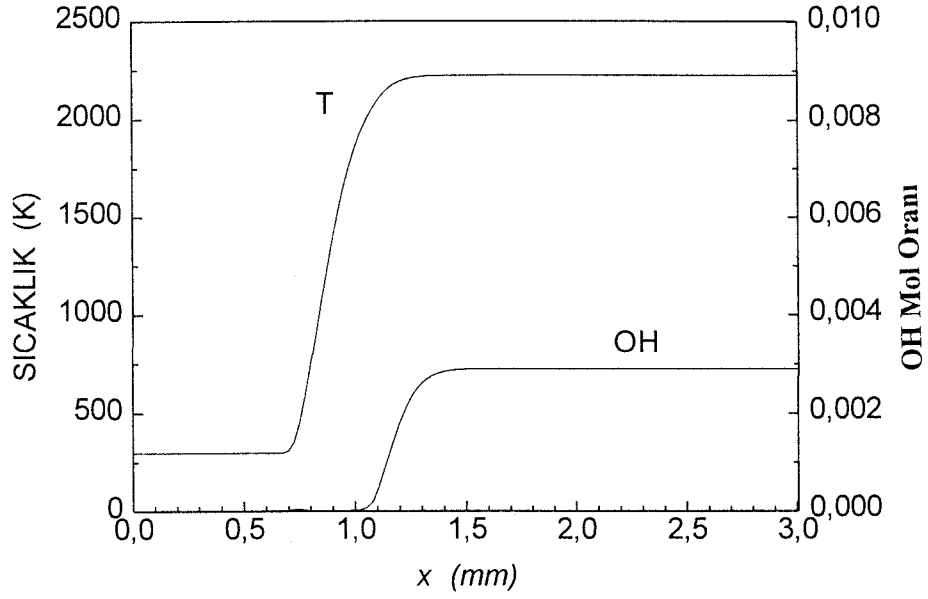
Coffee (1984) makalesinde 63 reaksiyon ve 20 bileşen içeren bir mekanizma vermiştir. Yaptığı modelleme sonucunda bu mekanizmanın yakıtça zengin karışımlarda, olması gerekenden daha düşük değerler verdiğini ancak stokiometrik alevlerde ise iyi uyum gösterdiğini belirtmektedir.

Grafiklerin irdelenmesi:

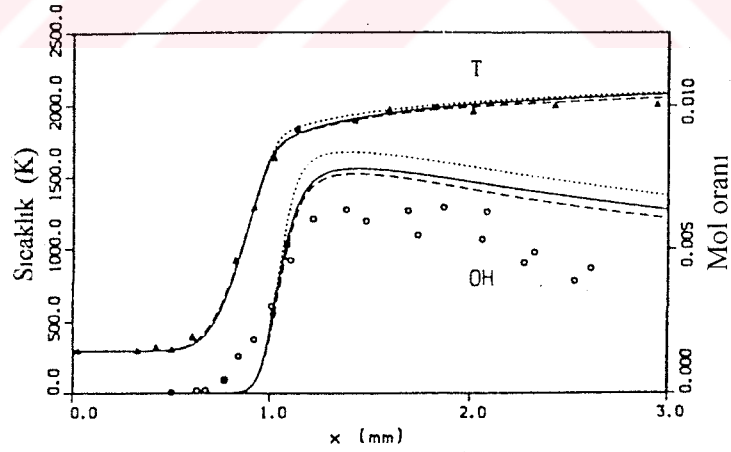
Şekil 2.9 ve Şekil 2.10 karşılaştırıldığında, önerdiğimiz modelin verdiği OH mol oranı Bechtel'in (Coffee, 1984'de verilmiş) deney sonuçlarından biraz daha düşük değerler vermektedir. Ayrıca deney sonuçları, bir noktadan sonra OH mol oranının düşmeye başladığını göstermesine karşın önerilen modelde, belli bir pik değerinden sonra oran sabit kalmaktadır. Bu durumu düzeltmek için mekanizmaya ilave edilen elementer reaksiyonlar ise diğer bileşenleri olumsuz etkilediğinden mekanizmaya konulmamışlardır.

Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 CO ve H₂ mol oranlarının alev boyunca değişimini vermektedir. Modelimizde CO ve H₂'nin ortaya çıkması (üremesi) aynı noktadan başlamaktadır. Coffee'nin modelinde ise belirgin bir farklılık vardır. Bechtel'in deneyleri de bu ürünlerin ortaya çıkış yerini birbirine yakın vermektedir. Bizim modelimiz buna kısmen uymakla beraber, deneysel sonuçlar ön ısınma bölgesine doğru yayvanlaşmakta bizim modelimizde ise daha dik bir çıkış seyretmektedir. Bu durum DUZALEV programında iterasyonu kesmek için koşul verilmediğinde, bir süre sonra yakalanmaktadır, ancak bu yol sağlıklı değildir.

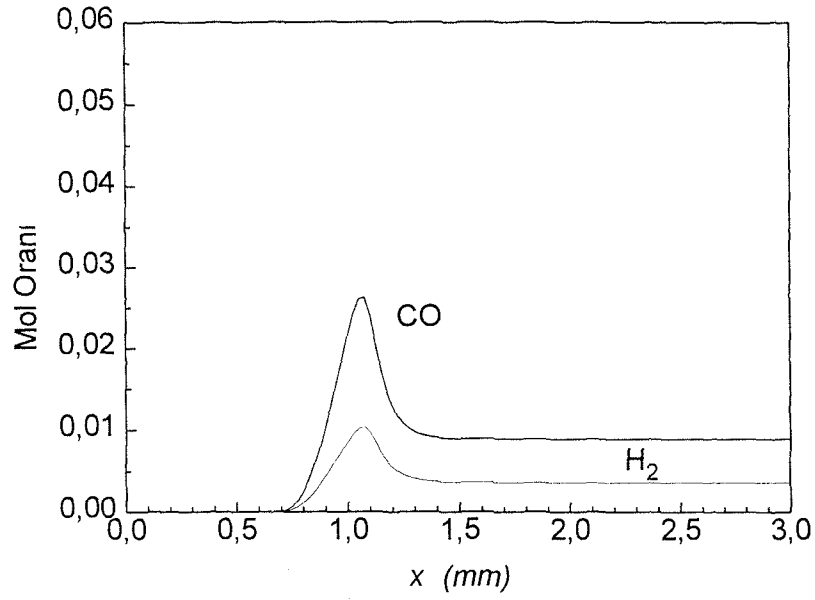
Şekil 2.13 ve 2.14'de CH₄ ve O₂'nin mol oranlarındaki değişime bakıldığında, hem Coffee (1984)'de verilen hem önerdiğimiz model benzer sonuçlar vermiştir. Buradaki uyum, yapılan başka denemelerde de aynı çıkmaktadır. Bu da ana bileşenlerin reaksiyonlarının iyi tanımlanmış olduğunun bir göstergesidir.



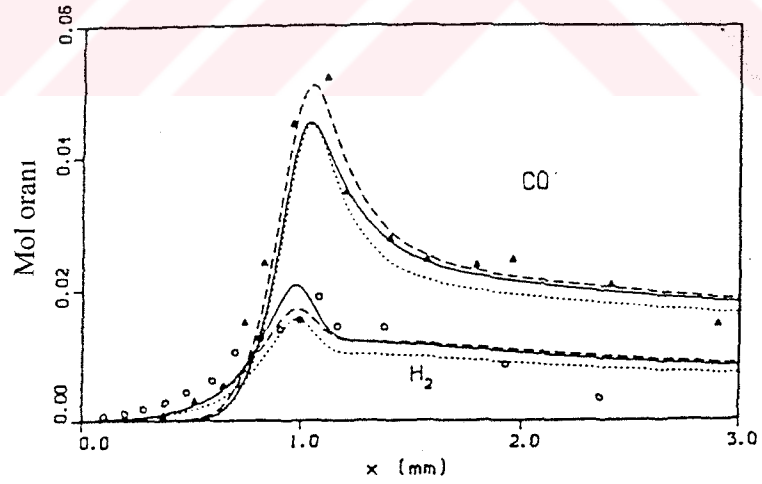
Şekil 2.9 Stokiyometrik metan-hava alevinde OH mol oranı ve sıcaklığın alev boyunca değişimi. (Geliştirilen DUZALEV programının ve reaksiyon mekanizmasının (Tablo A.2) verdiği sonuçlar.)



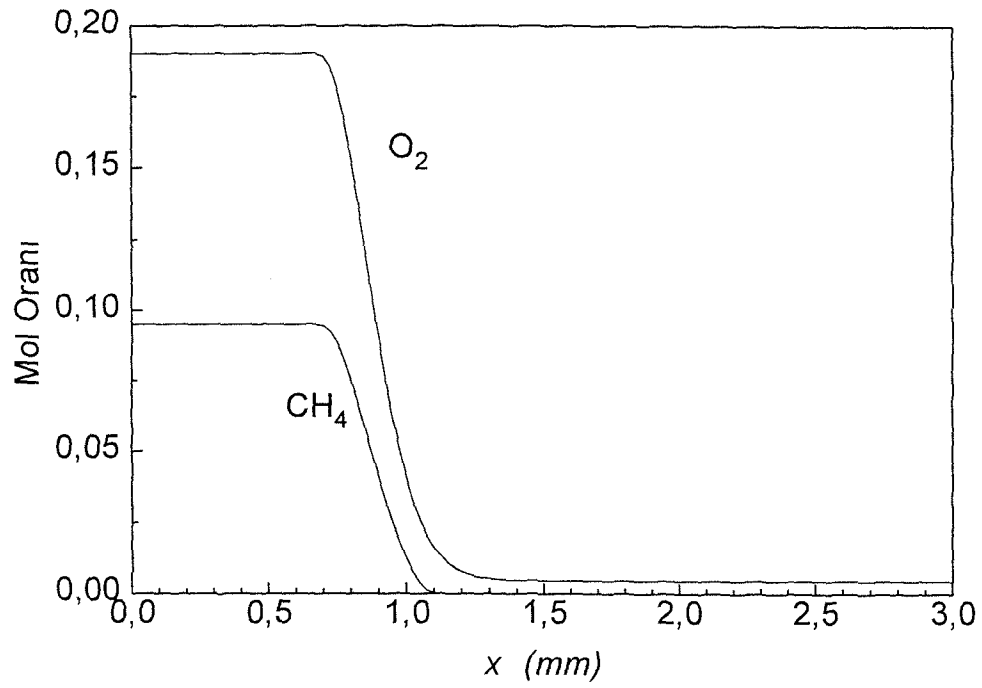
Şekil 2.10 Stokiyometrik metan - hava alevinde OH mol oranı ve sıcaklık değişimi. Sürekli çizgiler Coffee'nin 20 bileşenli modeline, kesikli çizgiler Dixon-Levis modeline, noktalar Warnatz modeline ve semboller Bechtel deneylerine ait değerleri göstermektedir. Grafik Coffee'den (1984) aynen alınmıştır.



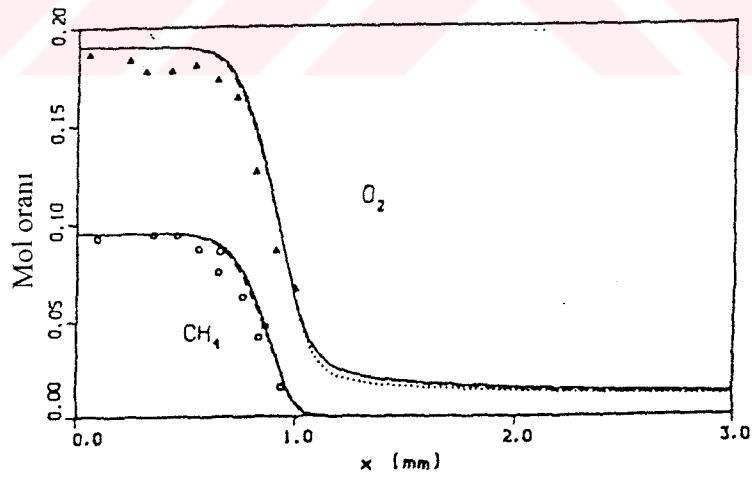
Şekil 2.11 Stokiyometrik metan-hava alevinde CO ve H_2 mol oranlarının alev boyunca değişimi. (Geliştirilen DUZALEV programının ve reaksiyon mekanizmasının (Tablo A.2) verdiği sonuçlar.



Şekil 2.12 Stokiyometrik metan - hava alevinde CO ve H_2 mol oranı ve sıcaklık değişimi. Sürekli çizgiler Coffee'nin 20 bileşenli modeline, kesikli çizgiler Dixon-Levis modeline, noktalar Warnatz modeline ve semboller Bechtel deneylerine ait değerleri göstermektedir. Grafik Coffee'den (1984) aynen alınmıştır.

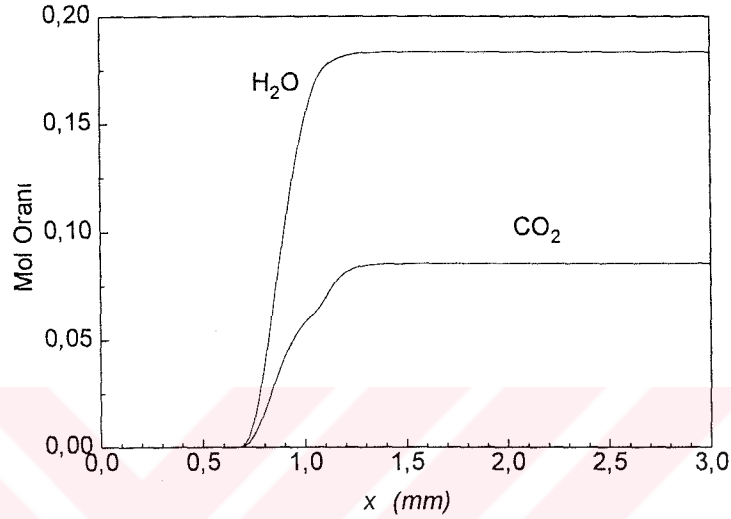


Şekil 2.13 Stokiyometrik metan-hava alevinde O_2 ve CH_4 mol oranlarının alev boyunca değişimi. (Geliştirilen DUZALEV programının ve reaksiyon mekanizmasının (Tablo A.2) verdiği sonuçlar.

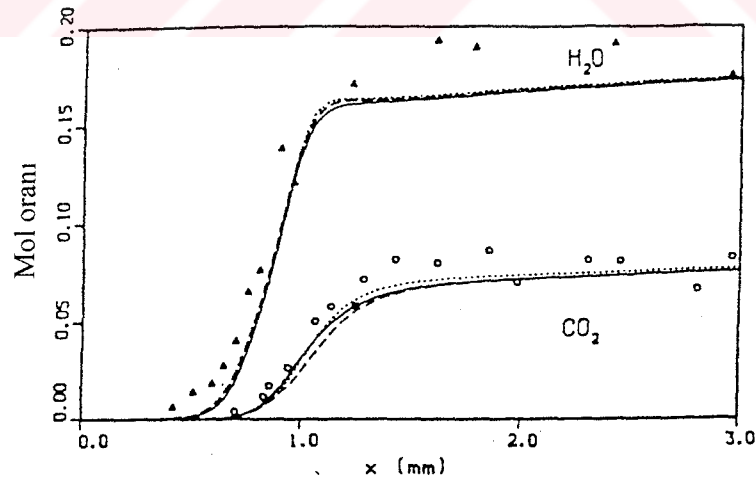


Şekil 2.14 Stokiyometrik metan - hava alevinde O_2 ve CH_4 mol oranı ve sıcaklık değişimi. Sürekli çizgiler Coffee'nin 20 bileşenli modeline, kesikli çizgiler Dixon-Levis modeline, noktalar Warnatz modeline ve semboller Bechtel deneylerine ait değerleri göstermektedir. Grafik Coffee'den (1984) aynen alınmıştır.

Şekil 2.15 ve 2.16'da metan-hava alevinde H_2O ve CO_2 mol oranlarının alev boyunca değişimi gösterilmiştir. Modelimiz, bu iki ürünün final değerlerini iyi bir uyum içinde verirken, ön ısınma bölgesine doğru deneysel verilerden sapmaktadır. Modelimize göre burada da her iki ürün aynı anda ortaya çıkıyor görünmektedir. Bu ise deneysel gerçeklere uymamaktadır.

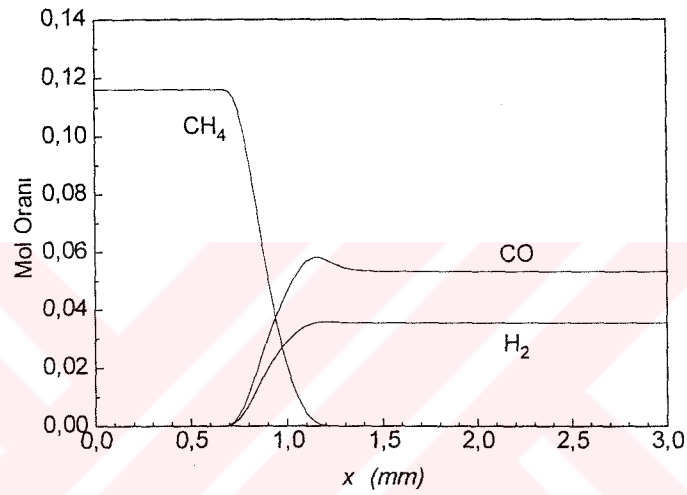


Şekil 2.15 Stokiyometrik metan-hava alevinde H_2O ve CO_2 mol oranlarının alev boyunca değişimi. (Geliştirilen DUZALEV programının ve reaksiyon mekanizmasının (Tablo A.2) verdiği sonuçlar.

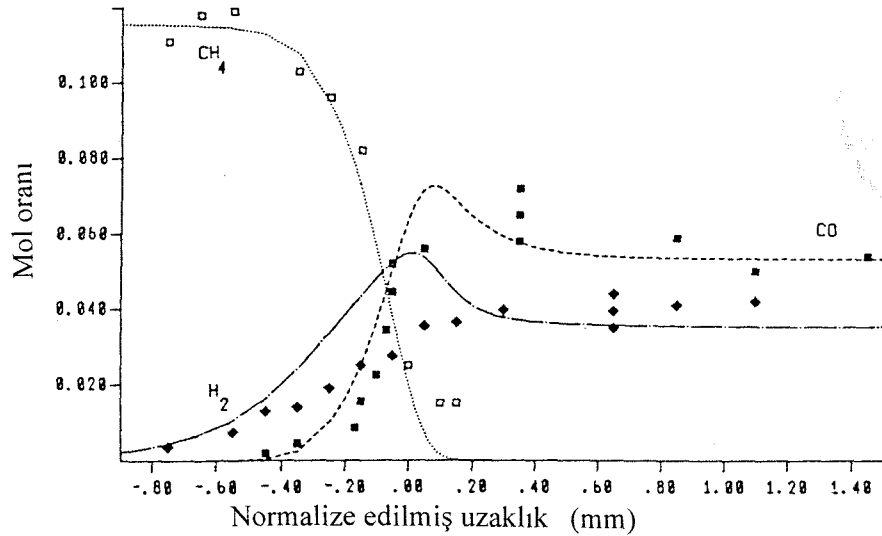


Şekil 2.16 Stokiyometrik metan - hava alevinde OH mol oranı ve sıcaklık değişimi. Sürekli çizgiler Coffee'nin 20 bileşenli modeline, kesikli çizgiler Dixon-Levis modeline, noktalar Warnatz modeline ve semboller Bechtel deneylerine ait değerleri göstermektedir. Grafik Coffee'den (1984) aynen alınmıştır.

Metan-hava alevinde is oluşumunu incelemek amacıyla oluşturduğumuz modelimizin yalnız stokiometrik yanma halinde denenmesi yeterli olmayacaktır. Çünkü is yakıtça zengin yanma olaylarında ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla Jones ve Lindstedt'in (1988) yaptığı çalışmaya baş vurulmuştur. Yakıt/hava eşdeğer oranı, $\Phi=1.25$ için, ön karışımli laminar metan-hava alevi için yapılan bu çözüm Şekil 2.17'de verilmiştir. Jones ve Lindstedt (1988) dört adımlı global reaksiyon şeması ile yaptıkları çözümde Şekil 2.18'de verilen sonuçları elde etmişlerdir. Verdikleri bu çözüm için kullandıkları basınç ve sıcaklığı bildirmemişlerdir. Modelimizde yukarıda değinilen sorunlar burada da ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.17 Yakıtça zengin ($\Phi=1.25$) önkarişimli metan-hava alevinde CH_4 , CO ve H_2 mol oranlarının alev boyunca değişimi. (DUZALEV programının, Tablo A.2'de verilen reaksiyon mekanizmasıyla verdiği çözüm.)



Şekil 2.18 Önkarişimli, laminar yakıtça zengin ($\Phi=1.25$) metan-hava alevi için Jones ve Lindstedt'in (1988) çözümü ve Bechtel et al. deney sonuçları (semboller).

3. İS OLUŞUMU

3.1 Giriş

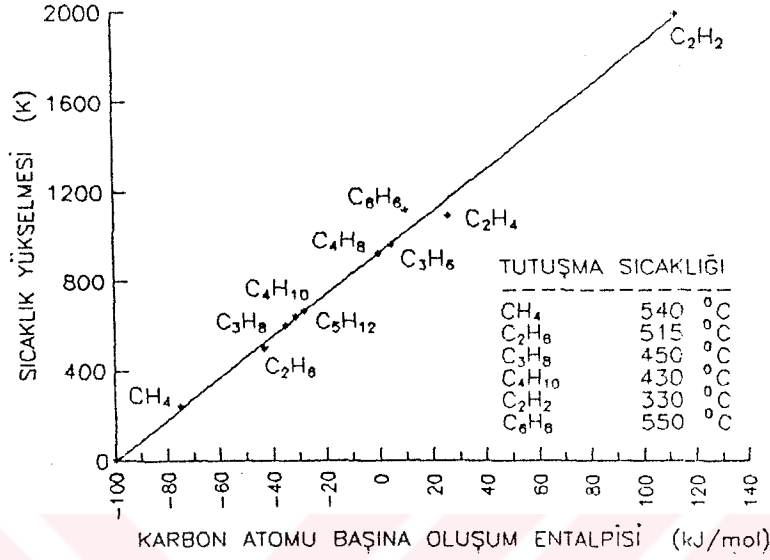
Yanma sırasında is oluşması, kötü yanma koşullarını ve enerji kaybını ifade eder. İS oluşması bacalardan kurum yağmasına, görüş uzaklığının düşmesine ve hava içindeki partikül hareketinin artmasına neden olur. Ayrıca is kanser yapıcı etkisiyle, insan sağlığını tehdit eder ki bu açıdan bakıldığında insanlık için önemli çevre problemlerinden birisidir. İS çıkaran araçlardan sıcak olarak çevreye atılan is taneciklerinin, yangın çıkmasına neden olabileceği de açıktır.

Endüstriyel fırınlarda ocak içindeki ısı transferinin büyük bir kısmı sıcak is taneciklerinin yaydığı ısı radyasyon yoluyla gerçekleşmektedir. Bu anlamda isin alev içinde oluşturulması ama bacaya ulaşmadan da yakılması problemi karşımıza çıkar. Endüstrideki yanma olaylarının çoğunda sıcaklık 1500 K ile 2500 K arasında değişir ve genellikle yakıtın tam yanması için yeterli oksijen ortamda mevcuttur. Bu şartlar altında oluşan isin toplam miktarı, tüketilen yakıttaki karbon miktarına oranla çok küçüktür. İsin oluşması için geçen süre ise birkaç milisaniye mertebesinde. Bu zaman boyunca yakıt moleküllerinin bir kısmı is taneciklerine sebebiyet verecek dönüşümlere uğrar.

İs oluşumuna etki eden faktörler çok çeşitlidir. Yakıtın bileşimi, viskozitesi ve uçuculuğu is oluşumunda önemli faktörlerdir. Yine yerel Yakıt/Hava oranı, yerel hidrokarbon konsantrasyonu, sıcaklık ve kalma süresi de is oluşumuna etki eder. 1800 K'in üzerinde ise O_2 'nin kısmi basıncı etkin olmaktadır (Haynes and Wagner, 1981). Haynes ve Wagner, yukarıda sayılan faktörlerin yanında C/O, C/H, brülör ağzından uzaklık gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak, is oluşumu üzerine yapılmış olan çalışmaların bir özeti sunulmuştur.

Leuckel (1984), hidrokarbonların is oluşturma eğilimlerini, karbon atomu başına oluşum entalpisi ve kısmi yakıt-hava yanması sonucu sıcaklık yükselmesi ilişkisine bağlı olarak vermektedir (Şekil 3.1). Leuckel'e göre, C atomu başına oluşum entalpisi arttıkça, yakıtın is

oluşturma eğilimi de artmaktadır. Bu durumda, Şekil 3.1'e göre is oluşturmaya, C_2H_2 en yatkın, CH_4 de en az yatkın yakıtlardır.

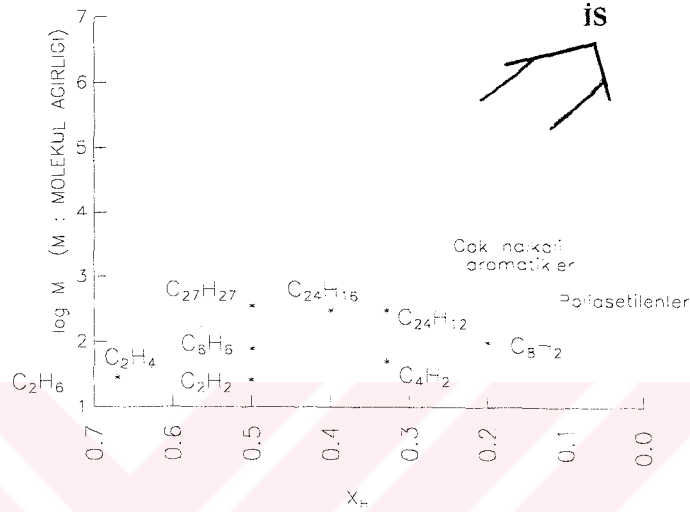


Şekil 3.1 Kısmi yanmada C atomu başına oluşum entalpisine göre sıcaklık yükselmesi (Leuckel, 1981).

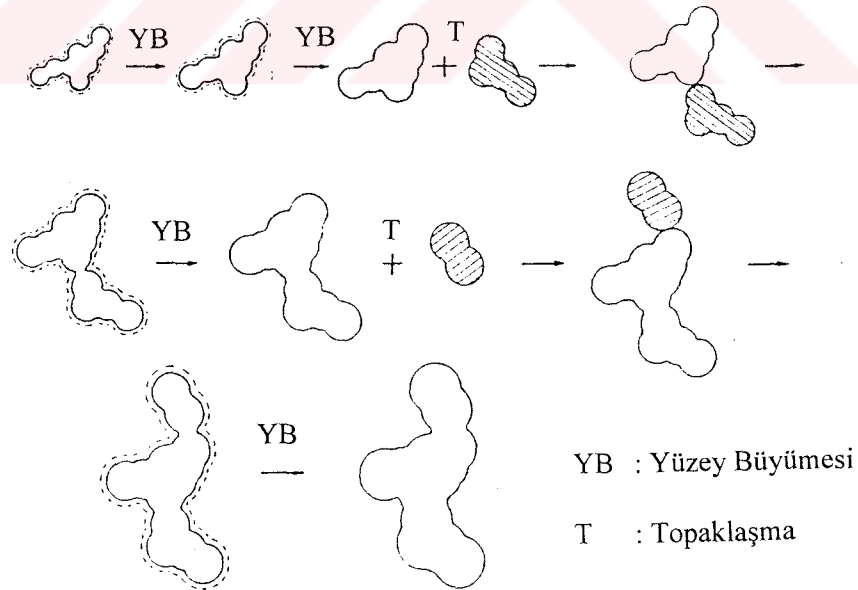
Genel olarak isin oluşması iki aşamada gerçekleşir: 1) Nüvenin ortaya çıkması, 2) Yüzey büyümesi. Nüvenin ortaya çıkması, yakıt moleküllerinin oksidasyonu ve pirolizi yoluyla açığa çıkan ürünlerin bir arada yoğunlaşmasıyla gerçekleşir. Bu ürünler tipik olarak, asetilen (C_2H_2) ve analogları ($C_{2n}H_2$) gibi değişik doymamış hidrokarbonlar ile çok halkalı aromatik hidrokarbonlar içerirler. Bu bileşikler, kendilerini meydana getiren elemanlara ayrılmaya karşı daha kararlı yapıdadırlar. Bu iki molekül tiptir alevlerde is oluşumunun kuvvetli bir işaretidirler. Bu maddelerin bir arada yoğunlaşmasıyla ilk is tanecikleri (nüklei) oluşmuş olur ki bunların çapları 20 Å'den küçüktür.

Yüzey büyümesi; bu kavram, tanecik yüzeyine gaz fazın bağlanması ve taneciğe katılması ile taneciğin hacimce büyümesini ifade eder. Bu prosesteki nitel gidiş, Şekil 3.2.'den görülebilir. Burada molekül ağırlığının logaritması aynı molekül için H mol oranına (X_H) bağlı olarak gösterilmiştir. $X_H > 0.5$ olan tipik bir yakıt ile başlanırsa, X_H 'ı 0.1-0.2 arasında değişen is taneciklerinin büyümesinde, ne asetilen zinciri, ne de çok halkalı aromatik hidrokarbonlar tek başlarına etkilidirler. Gerekli olan şey, uygun hidrojen içeren bileşiğin yoğunlaşması yada yüksek

hidrojen içeren türün, hidrojen gidermeyi takiben yoğunlaşması veya her ikisinin birlikte olmasıdır. Yüzey büyüme reaksiyonları is miktarında artışı doğurur fakat tanecik sayısı bu esnada değişmeden kalır. Bunun tersi de doğrudur, is taneciklerinin çarpışması ve kaynaşması sonucu topaklaşma (coagulation) yoluyla büyüme tanecik sayısının düşmesine yolaçarken, is miktarı sabit kalır (Şekil 3.3).



Şekil 3.2 İs oluşturmaya giden yol (Haynes and Wagner, 1981).



Şekil 3.3 İs oluşumunda yüzey büyümesi ve topaklaşma (coagulation) aşamalarının gösterilmesi (Megaridis and Dobbins, 1989).

Nüve oluşumu ve yüzey büyümesi kademelerinden oluşan bu safha "is oluşumu" (soot formation) olarak tanımlanır. Bunu çoğu kez "is oksidasyonu" evresi takibeder. Bu aşamada ise is, kendini çevreleyen yanma ürünleri içerisindeki CO, CO₂, OH gibi oksitleyicilerle yakılır. Sonuçta, herhangi bir yakma sisteminden dışarıya olan is emisyonu, aynı anda gerçekleşen is oluşumu ve is oksidasyonu reaksiyonları arasındaki dengeye bağlı olmaktadır.

3.2 İs Formülasyonu

Farmer at al. (1981), is oluşumu hızı için aşağıdaki ifadeyi önermektedirler,

$$R_F = A T^a C_{CH}^b C_O^c \exp\left\{-\frac{E}{RT}\right\} \quad \text{g/cm}^3 \quad (3.1)$$

Burada A , a , b , c ve E sabitler, C_{CH} hidrokarbonların mol sayıları, C_O oksijenin mol sayısıdır. Bu sabitlerin değeri, toulon (C₇H₈) yanması esnasında, yanmamış hidrokarbonun C₂H₂ olması halinde,

$$\begin{aligned} A &= 4.66 \times 10^{14} & a &= -1.94 \\ b &= 1.81 & c &= -0.5 \\ E &= 32000 \end{aligned}$$

olarak verilmiştir.

Yine aynı grup, is yüzeyinin birim alanından olan is oksidasyonu için Nagle ve Strickland-Constable'den (Farmer at al. (1981)'de adları geçmekte) aldıkları şu ifadeyi önermektedirler,

$$R_{ox} = 12 \left[\left(\frac{k_A \cdot P_{O_2}}{1 + k_Z \cdot P_{O_2}} \right) X + k_B \cdot P_{O_2} (1 - X) \right] \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \text{s}} \right] \quad (3.2)$$

Burada,

$$X = \left[1 + \frac{k_T}{k_T P_{O_2}} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

$$k_A = 20 \exp(-30000/RT) \quad (3.4)$$

$$k_T = 1.51 \times 10^{-5} \cdot \exp(-97000/RT) \quad (3.5)$$

$$k_B = 4.46 \times 10^{-3} \cdot \exp(-15200/RT) \quad (3.6)$$

$$k_Z = 21.3 \exp(4100/RT) \quad (3.7)$$

Bu durumda net is emisyonunu bulmak amacıyla, reaktör hacmini kontrol hacmi olarak alır ve is için bileşen korunumu prensibini uygularsak,

$$\frac{m}{\rho V} (C_s - C_{so}) = R_F - A_t R_{ox} \quad \left[\frac{g}{cm^3 s} \right] \quad (3.8)$$

ifadesini elde ederiz. Burada,

m	: Toplam kütleli debi	[g/s]
r	: Çıkıştaki gaz yoğunluğu	[g/cm ³]
V	: Reaktör hacmi	[cm ³]
C_s	: Çıkışta is konsantrasyonu	[g/cm ³]
C_{so}	: Girişte is konsantrasyonu	[g/cm ³]
A_t	: Birim hacimde, is oksidasyonunun gerçekleştiği toplam yüzey alanı	[cm ² /cm ³]
R_F	: İs oluşum hızı	[g/cm ³ s]
R_{ox}	: İs oksidasyonu hızı	[g/cm ³ s]

Denklem (3.8)'deki $\frac{m}{\rho V} = \frac{1}{t}$ olarak kalma süresinin tersini ifade etmektedir.

A_t 'nin çıkarılması:

Tek bir is taneciğinin kütlesi, $M = \rho_s \frac{\pi d^3}{6}$

1 cm³ gazdaki is taneciği sayısı, $N = \frac{C_s}{M}$

Bir taneciğin yüzey alanı, $S = \pi d^2$

ise;

$$A_t = N S = \frac{C_s}{M} S = \frac{C_s}{\rho_s \pi d^3} \pi d^2$$

$$A_t = \frac{6 C_s}{\rho_s d}$$

Burada, ρ_s isin yoğunluğunu, d is taneciğinin çapını ifade etmektedir.

NOT: Literatürde yukarıdaki (3.2) ve (3.5) denklemlerinde bir uyumsuzluk görülmüştür. Buradaki hali Haynes and Wagner'den alınmıştır (1981). Farmer at al. (1981)'da denklem (3.5)'deki 10'un üssü -5 yerine +5 olarak yazılmıştır. Garo et al. (1990) da aynı üssü +5 olarak almış, ancak denklem (3.2)'de köşeli parantez içindeki ilk X çarpanını hiç yazmamıştır. Ancak bu denklem ile yaptıkları hesapların sonuçları ile deney sonuçları arasında 33.9 ile 210.9 katlık bir fark hesaplamışlardır.

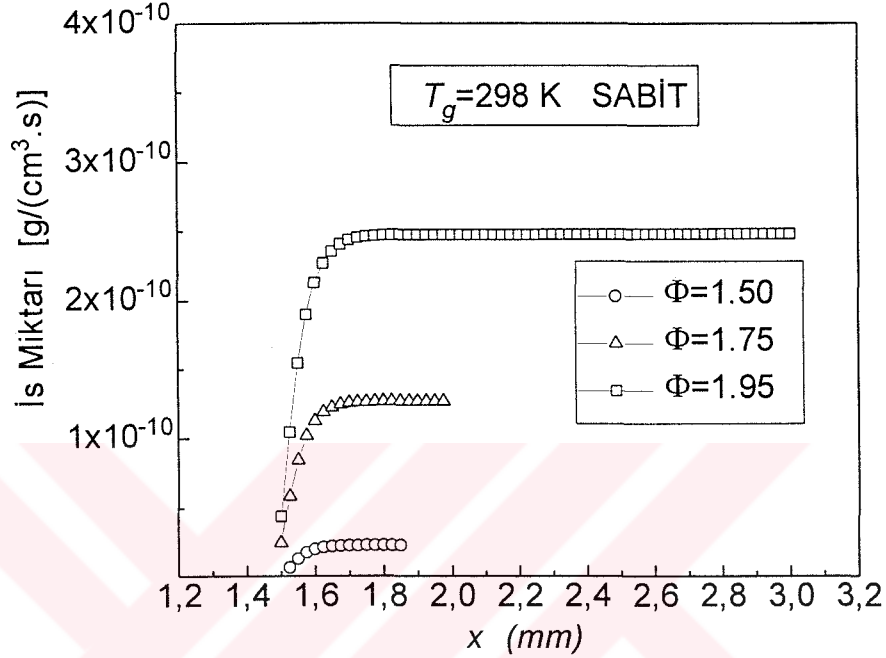
3.3 SOOT Alt Programı ve Sonuçları

Ön karışımli, laminar, düzlemsel alev içerisinde oluşan is miktarını, yukarıdaki formülasyonla hesaplayan ve DUZALEV ile birlikte çalışan bir alt program (SOOT) geliştirilmiştir. SOOT alt programının çalışma ilkesi şu şekildedir:

DUZALEV, alev boyunca oluşturulan ayırık çözüm noktalarında SOOT'u çağırır. SOOT çözüm noktasındaki asetilen mol sayısını kontrol eder. Eğer çözüm noktasında oluşmuş asetilen varsa (3.1) denklemini uyarınca is oluşum miktarını hesaplar. (3.1) Denklemindeki C_{CH} değeri olarak CH_2 , CH_3 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_3 , C_2H_4 , C_2H_5 ve C_2H_6 hidrokarbonlarının konsantrasyonları toplamı, C_O için de O_2 'nin konsantrasyonu alınmıştır. SOOT daha sonra, aynı çözüm noktasındaki oksijenin kısmi basıncını kullanarak, oksidasyona uğrayan is miktarını hesaplar. Oluşan is miktarından giderek, birim hacimde, is oksidasyonunun gerçekleştiği toplam yüzey alanını bulup, buradan $(A_t \times R_{OX})$ değerini hesaplayıp, oluşan is miktarı ile okside olan is miktarı arasındaki farkı alarak, o çözüm noktasındaki net is miktarını verir.

DUZALEV ve SOOT programı birlikte çalıştırılarak, yakıt/hava eşdeğer oranının 1'den büyük dört farklı değeri ($\Phi=1.25, 1.50, 1.75, 1.95$) için ve ayrıca $\Phi=1.75$ değeri baz alınarak, gaz giriş sıcaklığının yine dört farklı değeri için ($T_g=298, 325, 350, 375$ K) elde edilen

sonuçlar Şekil 3.4 ve 3.5’de verilmiştir. Bütün hesaplamalarda reaktör boyu 3 mm alınmış olup bu mesafe 120 çözüm noktasına ayrılmıştır. İsin çapı 40×10^{-7} cm (400 Å) , isin yoğunluğu ise 2 g/cm^3 olarak alınmıştır.



Şekil 3.4 Önkarişımılı, laminar, düzlemsel metan-hava alevinde değişik Yakıt/Hava eşdeğer oranları için ($\Phi = \text{ER}$) oluşan net is miktarları. ($T_g = 298 \text{ K}$)

$\Phi = 1.25$ değeri için is oluşmadığı, buna karşılık diğer Φ değerleri için, Φ büyüdükçe oluşan isin miktarının da arttığı görülmektedir (Şekil 3.4). Bu durum, literatürde değişik gaz yakıtlar için söylenenlerle genel bir uyum içindedir. Ancak karşılaştırma için metan yanmasına ait uygun değerler bulunamamıştır.

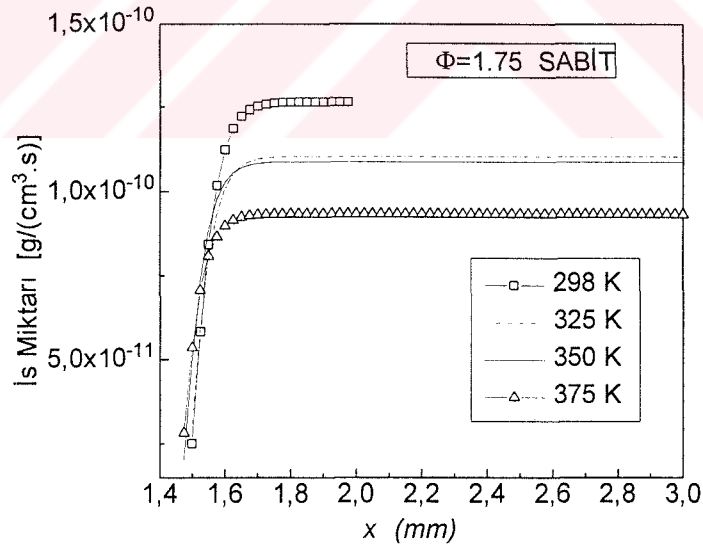
Şekil 3.5’de metan+havadan ibaret olan karışımının, reaktöre giriş sıcaklığı değiştirilerek elde edilen değerler topluca verilmiştir. Buradan görülebileceği gibi $\Phi = 1.75$ aynı kalmak kaydıyla, reaktöre giriş sıcaklığı yükseltildiğinde, oluşan is miktarında azalma eğilimi vardır. Ancak çalıştığımız sıcaklık aralığında (298 ... 375 K) bu durum çok belirgin değildir. Giriş sıcaklığı yükseldikçe is miktarının azalması, giriş sıcaklığının yükselmesinin neden olduğu alev sıcaklığındaki yükselme ve bunun sonucu olarak da is oksidasyonunun artıyor olması şeklinde

açıklanabilir. Aynı açıklama Şekil 3.4'deki durum için de yapılabilir. Burada da giriş sıcaklığı sabit kalırken, artan Φ değerine bağlı olarak alev sıcaklığı düşmekte ve buna bağlı olarak da is oksidasyonu azaldığından net is miktarı artmaktadır. Bu çalışmada bütün alevler adyabatik alev kabulüyle incelenmiştir. Tablo3.1'de $\Phi=1.75$ sabit değerinde, değişik T_g sıcaklıklarına karşılık ve $T_g=298$ K sabit değerinde, değişik Φ 'ler için hesaplanan adyabatik alev sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 3.1

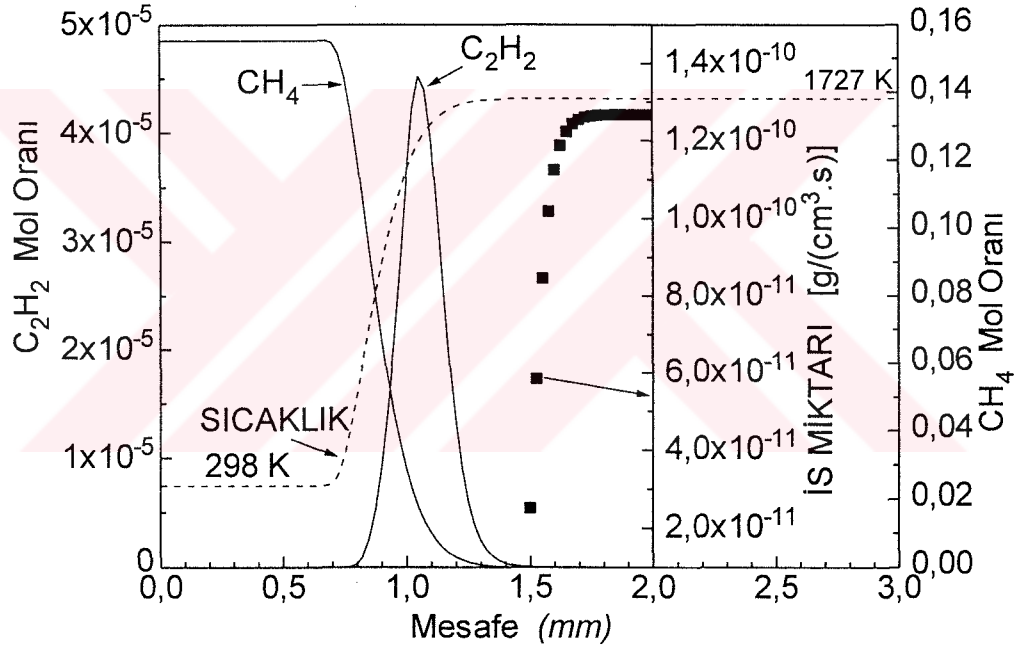
Sabit Φ , değişik T_g ve sabit T_g değişik Φ 'ler için adyabatik alev sıcaklıkları (T_{ady}).

$\Phi = 1.75$		$T_g = 298$ K	
T_g	T_{ady}	Φ	T_{ady}
298	1727	1.00	2226
325	1745	1.25	2096
350	1762	1.75	1727
375	1780	2.25	1411



Şekil 3.5 Önkarışımli, laminar, düzlemsel metan-hava alevlerinde, $\Phi = 1.75$ için değişik gaz (Yakıt+Hava) giriş sıcaklıklarına göre net is miktarları.

İs oluşumu, alev boyunca incelendiğinde yakıcı (burner) ucundan hemen üstte is oluşumuna öncülük eden bileşenlerin (burada C_2H_2) ortaya çıktığı ve bir pik oluşturduğu, sonra tükenme reaksiyonlarına girerek yok oldukları görülür. Yaklaşık olarak bu tükenmenin son bulunduğu mesafelerde ise isin ortaya çıkmaya başladığı görülür. İs öncüllerinin pik yaptığı mesafe, alev içinde sıcaklığın pik değer aldığı yerin hemen altındadır (Calcote, 1981). Bu bilgilerden hareketle, $\Phi = 1.75$, $T_g = 298$ K şartlarındaki alev için Şekil 3.6 oluşturulmuştur. Bu şekilden de görüldüğü üzere, C_2H_2 mol oranı en yüksek değerini 1.1 mm civarında alırken, sıcaklık değeri ise yaklaşık 1.3 mm'de almaktadır. Asetilenin 1.5 mm den sonra tükendiği ve bu sırada isin oluşmaya başladığı görülmektedir. Buradan da DUZALEV ve SOOT programlarının sonuçlarının tutarlı olduğu sonucu çıkarılabilir.



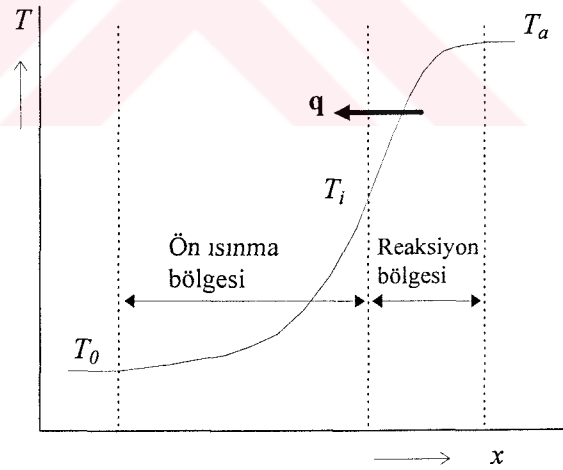
Şekil 3.6 Önkarışım, laminar düzlemsel bir alevde sıcaklığın ve yakıt (CH_4) ile C_2H_2 mol oranlarının alev boyunca değişimi ve isin ortaya çıkması. ($\Phi = 1.75$ ve gaz giriş sıcaklığı $T_g = 298$ K için)

4. GAZ KARIŞIMLARI İÇİN TAŞINIM BÜYÜKLÜKLERİNİN (TRANSPORT COEFFICIENT) HESAPLANMASI

4.1. Giriş

Yanma olaylarında, gaz karışımları, yakıt ve yakıcı gazların karışımı yada yanma sonucunda ortaya çıkan yanma ürünlerinin karışımı olarak karşımıza çıkarlar. Her iki durumda da yanmanın incelenebilmesi için bu gaz karışımına ait taşınım özelliklerinin (transport properties) bilinmesi gerekir. Nitekim Bölüm 2’de, düzlemsel alev için elde edilmiş olan, bileşenlerin ve enerjinin korunumu denklemlerinin sayısal çözümlerinin yapılabilmesi için ısı iletim katsayısı veya difüzyon katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Bu bölümde, taşınım özelliklerinden *viskozite*, *ısı iletim katsayısı* ve *difüzyon katsayısı*nın hesaplanması üzerinde durulacaktır.

Sıcaklık gradyanının çok büyük veya gaz tabakası kalınlığının çok ince olduğu uygulama alanlarında gazlardaki ısı iletimi önemli bir hal alır. Laminar bir alev içerisinde, bu iki şart birden mevcuttur. Birkaç mm’lik alev boyunca sıcaklık gradyanı 1000 K/mm’yi geçebilir (Şekil 4.1). T_0 sıcaklığında reaktöre giren gazlar, adyabatik yanma halinde, tepkime sonunda T_a sıcaklığına (adyabatik alev sıcaklığı) ulaşır ve bu sıcaklıkta akmaya



Şekil 4.1 Tipik bir laminar alev boyunca sıcaklık değişiminin, şematik olarak gösterilmesi.

devam ederler. x Yönünde akmakta olan yanıcı karışım, T_i sıcaklığına ulaştığında yakıt tutuşur. Tepkime bölgesinde sıcaklığın artış hızı, ön tepkime bölgesine göre daha fazladır. Yanmanın

(kimyasal tepkimenin) sürekli olabilmesi için tepkime bölgesine giren yanıcı gaz karışımı, tutuşma sıcaklığına kadar ısınmış olmalıdır. İşte bu ısınma işlemi, tepkime bölgesinden, ön tepkime bölgesine ısı transferi (q) yoluyla olmaktadır. Buradaki ısı transferi, ısı iletimi ve kütle difüzyonu yoluyla gerçekleşmektedir.

Reaksiyon kinetiği ile ilgili teorik çalışmalarda, reaksiyon bölgesinde mesafeye bağlı olarak bileşen konsantrasyonlarının hesaplanması gerekmektedir. Bu da korunum denklemlerinin bu bölge için çözülmesini gerektirir. Korunum denklemlerinden biri olan enerjinin korunumu denklemi ısı iletim katsayısını, bileşen korunumu denklemi de difüzyon katsayısını içerir. Lewis sayısı bire eşit ($Le=1$) alınmak suretiyle, bunlardan biri safdışı bırakılarak, yalnız ısı iletim katsayısı veya yalnız difüzyon katsayısı ile de çözüme gidilebilir. Dolayısıyla, her bir çözüm noktasında, değişik bileşen konsantrasyonlarına sahip gaz karışımının ısı iletim katsayısı ve/veya difüzyon katsayısının bilinmesi (hesaplanması) gerekir.

Literatürde, yanma sırasında oluşan bileşenlerin konsantrasyonlarını veren bilgisayar programları mevcuttur (Pratt and Wormeck 1976), (Kee at al., 1981). Ancak bu programlar herhangi bir çözüm noktası için verilen basınç, sıcaklık ve bileşen konsantrasyonlarının giriş değerlerine bağlı olarak, reaksiyon sonucu ortaya çıkan bileşenlerin konsantrasyonlarını vermektedir. Bir akış alanı boyunca bileşen konsantrasyonlarını hesaplamak için bu mevcut bilgisayar programları ile birlikte çalışacak ve ısı iletim katsayısı ile difüzyon katsayısını hesaplayacak alt programlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla çalışmamız dahilinde, **CONDVISC** ve **DIFFCOEF** programları geliştirilmiştir. **CONDVISC** ve **DIFFCOEF** programlarında kullanılan matematik modeller ile programların verdikleri sonuçların, literatürde bulunabilen deneysel verilerle kıyaslanması aşağıdaki kısımlarda verilmiştir.

4.2. Matematik Model

Gazlar için ısı iletim katsayısı ve viskozite değerlerinin hesaplanmasında kullanılan denklemler; ister tek bir bileşen ister karışım için olsun benzer yapıdadırlar. Ancak difüzyon katsayısına ait denklemler farklılık arz etmektedir. Bu nedenle, ısı iletim katsayısı ve viskozite hesabı için tek bir alt program, difüzyon katsayısı hesabı için de başka bir alt program tasarlanmış ve yapılmıştır.

4.2.1. Isı İletim Katsayısı ve Viskozite Hesabı için Matematiksel Model

Gazların kinetik teorisinden hareketle, Chapman-Eskong tarafından, monoatomik gazların ısı iletim katsayısını hesaplamak üzere geliştirilen ifade aşağıdaki şekildedir (Strehlow, 1985):

$$\lambda_{mono} = 2.6330 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{T/W}}{\sigma_0^2 \Omega_\lambda} \quad [\text{J} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})] \quad (4.1)$$

Burada, λ_{mono} tekatomlu gazın ısı iletim katsayısını, T mutlak sıcaklığı, W gazın molekül ağırlığını, σ_0 molekül çapını ve Ω_λ da çarpışma integralini ifade etmektedir.

Çokatomlu gazlar için ısı iletim katsayısı ifadesi, (4.1) ifadesinde düzeltmeler yapmak şeklinde, Eucken ve Hirschfelder tarafından ayrı ayrı verilmiştir. Bu çalışmada önce, her iki ifade ayrı ayrı kullanılarak, N_2 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2 gibi gazlar için ısı iletim katsayıları hesaplanmış ve Eucken ifadesinin deneysel değerlerle daha iyi uyum sağladığı görüldükten sonra, onun kullanılmasına karar verilmiştir. Eucken'in verdiği eşitlik,

$$\lambda_i = \lambda_{mono} \left[\frac{1}{3} + \frac{4}{15} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right] \quad (4.2)$$

şeklinde (Strehlow, 1985). Burada, $\gamma = c_p / c_v$ olarak ısınma ısıları oranıdır. (4.1) ve (4.2) eşitlikleriyle beraber, karışım için ısı iletim katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir:

$$\lambda_{mix} = \sum_{i=1}^{NS} \frac{\lambda_i}{1 + \frac{1.065}{X_i} \sum_{j=1, j \neq i}^{NS} X_j \chi_{ij}} \quad (4.3)$$

Mason ve Saxena (Strehlow, 1985) tarafından verilmiş olan bu eşitlikte, NS , karışımında bulunan bileşenlerin toplam sayısını; X_i ve X_j karışımı oluşturan herbir bileşenin mol oranını ifade etmektedir. χ_{ij} terimi ise molekül ağırlıkları ve viskozitelere bağlı bir büyüklük olup değeri, aşağıda görüldüğü gibi belirlenmektedir:

$$\chi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{W_i}{W_j} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{W_j}{W_i} \right)^{1/4} \right]^2 \quad (4.4)$$

Burada μ , herhangi bir bileşen için dinamik viskoziteyi ifade etmektedir. Kinetik teoriye göre herhangi bir gazın dinamik viskozitesi,

$$\mu = 8.4411 \times 10^{-7} \frac{\sqrt{WT}}{\sigma_0^2 \Omega_\mu} \quad [\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s})] \quad (4.5)$$

ifadesiyle tanımlanmıştır. Buradaki Ω_μ da çarpışma integralini ifade etmektedir. Viskozite ve ısı iletim katsayılarının hesaplanmasında kullanılan çarpışma integralleri birbirine eşittir ($\Omega_\lambda = \Omega_\mu$). İndirgenmiş sıcaklık ($T^* = \kappa T / \varepsilon$) değerlerine bağlı olarak Ω değerleri ile κ / ε ve σ_0 değerleri literatürde bulunmaktadır. Burada kullanılan değerler, Göğüş (1990)'ten düzenlenerek alınmışlardır.

Karışımın viskozitesi de Wilke (Strehlow, 1985) tarafından verilen yarıampirik bir formülle aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^{NS} \frac{\mu_i}{1 + \frac{1}{X_i} \sum_{j=1, j \neq i}^{NS} X_j \chi_{ij}} \quad (4.6)$$

4.2.2. Diffüzyon Katsayısı Hesabına Ait Matematiksel Model

Chapman-Enskog teorisine göre, Lennard-Jones parametreleri kullanılarak, ikili diffüzyon katsayısı aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanabilir.

$$D_{ij} = 5.9543 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{T^3 \left[(1/W_i) + (1/W_j) \right]}}{P(\sigma_0)_{ij}^2 \Omega_{D_{ij}}} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (4.7)$$

Burada P pascal olarak basıncı ve Ω_D diffüzyon için çarpışma integralini ifade etmektedirler.

Ω_D çarpışma integrali, düzeltme faktörü olarak da adlandırılır. Boyutsuzdur ve $(\kappa T / \varepsilon)_{ij}$ 'ye bağlı olarak hesaplanabilir. $(\kappa / \varepsilon)_{ij}$ ve $(\sigma_o)_{ij}$ aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$(\sigma_o)_{ij} = \frac{1}{2} (\sigma_{o_i} + \sigma_{o_j}) \quad (4.8)$$

ve

$$\left(\frac{\varepsilon}{\kappa} \right)_{ij} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{\kappa} \right)_i \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\kappa} \right)_j} \quad (4.9)$$

Denklem (4.7)'de $W_i=W_j$ alınarak self difüzyon katsayısı da hesaplanabilir.

Herhangi bir i bileşenin, bir karışımın içine difüzyonu ise,

$$D_{i,m} = \frac{1 - Y_i}{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}} \frac{X_i}{D_{ij}}} \quad (4.10)$$

eşitliği ile hesaplanabilir (Warnatz, 1983; Eraslan and Brown, 1988; Brown and Eraslan, 1988)

4.3. CONDVISC Alt Programı

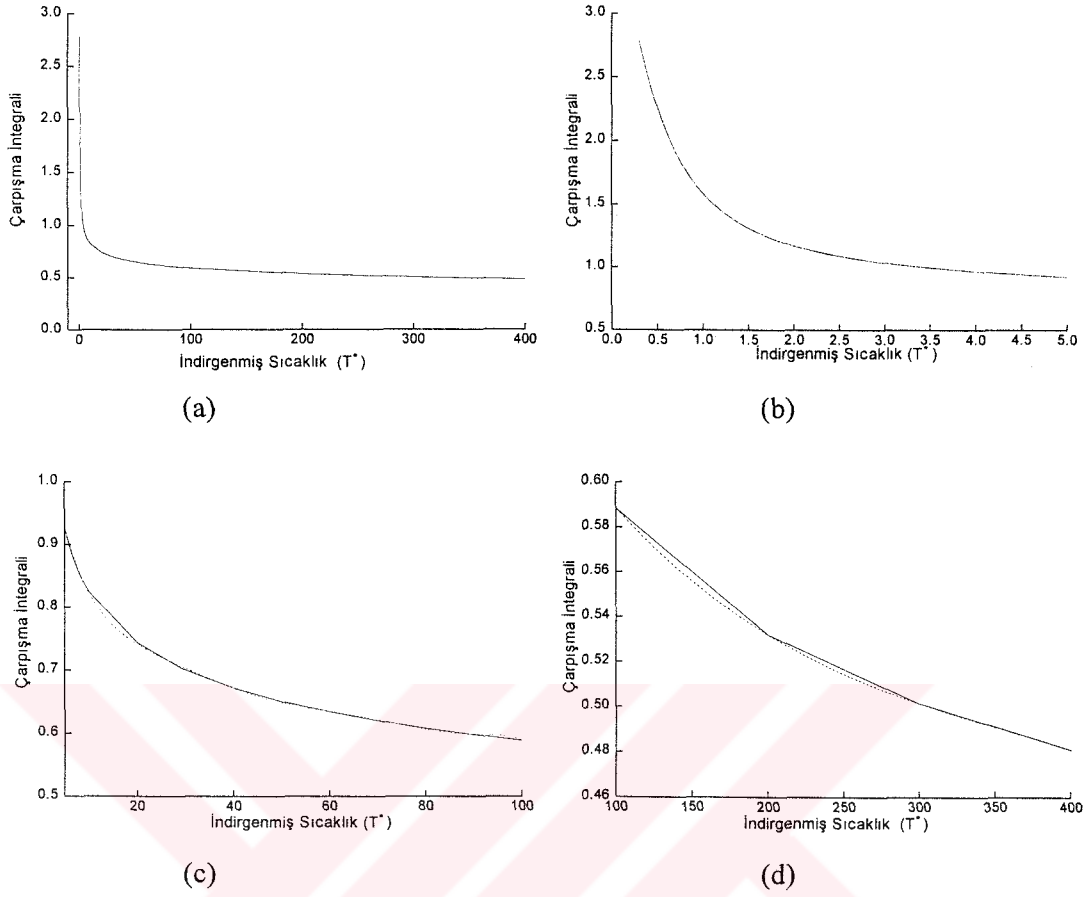
CONDVISC (Thermal **CON**ductivity and **VISC**osity), Fortran-77 kodunda oluşturulmuş bir altprogramdır. CREK bilgisayar programı (Pratt and Wormeck, 1976) ile bağlantılı olarak çalışacak şekilde oluşturulmuştur. Ancak istendiğinde, birkaç satırlık bir ana program yazılarak bağımsız olarak da çalıştırılabilmektedir. CONDVISC herhangi bir gaz karışımını oluşturan bileşenlerin tek tek olduğu gibi karışım olarak da ısı iletim katsayısı ve viskozitelerini hesaplar.

Karışımı oluşturan bileşenlere ait mol oranları, molekül ağırlıkları, basınç ve sıcaklık değerleri CREK'ten alınır. CONDVISC ilk çağrıldığında, TRCOEFF.DAT dosyasından bileşen adlarını, bu bileşenlere ait ε/κ ve σ_o değerlerini okur. Sonraki her çağırılıştaki;

- Bileşenlere ait mol oranları ve karışım sıcaklığı CREK'ten alınır,
- CREK'ten gelen, karışımı oluşturan bileşenlere ait gerekli dataların TRCOEFF.DAT dosyasında bulunup bulunmadığını kontrol eder,
- Bulunan bileşenler için ε/κ ve σ değerlerinin ataması yapılır,
- Herbir bileşene ait C_p , C_v ve γ değerleri hesaplanır. Bu işlem için CREK bünyesinde bulunan HCPS alt programı kullanılır
- Karışım sıcaklığına bağlı olarak, indirgenmiş sıcaklık ve buna bağlı olarak da çarpışma integralleri (Ω_λ), daha önce oluşturulmuş bir polinoma göre hesaplanır.
- Herbir bileşen için viskozite ve ısı iletim katsayıları hesaplanır,
- Karışım için viskozite ve ısı iletim katsayıları hesaplanır,
- Ana programa dönülür.

Çarpışma integralleri, indirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmıştır. Bunun için önce indirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak, çarpışma integrali (Ω_λ) değerleri bir polinom olarak çizilmiştir. Bu polinomun, indirgenmiş sıcaklığın 0-5 arasındaki değerleri için çok dik bir iniş göstermesi nedeniyle (Şekil 4.2-a) polinom, 0-5 aralığı için 7. dereceden, 5-100 aralığı için 7. dereceden ve 100-400 aralığı için de 3. dereceden olmak üzere üç ayrı polinoma ayrılmıştır (Şekil 4.2 b, c, d). Uydurulan bu polinomların katsayıları CONDVISC içinde bir FUNCTION alt programı olarak kullanılmıştır.

(4.1) Denkleminde (4.5) denklemine kadar görülebileceği gibi bunlar kesirli ifadelerden oluşmaktadırlar. Karışımı oluşturan bileşenlerden birisi TRCOEFF.DAT dosyasında bulunmuyorsa, bu bileşene ait değerler sıfır olarak atanacaklardır. Paydadaki bir terimin sıfır değer alması ise programın çalışmasına engel olmaktadır ("*Division by zero*" hatası). Bu nedenle karışımı oluşturan bileşenlerden herhangi birine ait değerler TRCOEFF.DAT dosyasında bulunmuyorsa, bu bileşen karışımda yok sayılmaktadır. Bu durum, bazı ender bileşenler için sözkonusu olabilirse de böyle bir bileşenin karışım içindeki oranı küçük olacağından, karışıma ait sonuç değerleri üzerindeki etkisi de az olacaktır.



Şekil 4.2 İndirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak, çarpışma integralinin değişimini gösteren grafik. (Sürekli çizgiler tablo değerlerinden, kesik çizgiler de eğri uydurma ile elde edilmiştir.)

4.4 DIFFCOEF Alt Programı

DIFFCOEF (**DIFF**usion **COEF**ficient), Fortran-77 kodunda, gazlar için ikili difüzyon katsayısını ve karışım difüzyon katsayısını hesaplamak amacıyla hazırlanmış bir bilgisayar programıdır. CREK (Pratt and Wormeck, 1976) ile uyumlu çalışacak şekilde oluşturulmuştur. Ancak istendiğinde, CONDVISC'de olduğu gibi, birkaç satırlık bir ana program yazılarak bağımsız olarak da çalıştırılabilir.

DIFFCOEF alt programı da ε/κ ve σ değerlerini TRCOEFF.DAT dosyasından okumaktadır. Gaz karışımını oluşturan bileşenlere ait mol oranları, molekül ağırlıkları, basınç

ve sıcaklık değerleri CREK'ten alınır. DIFFCOEF alt programının algoritması aşağıda yazıldığı gibidir:

- Bileşenlere ait mol oranları ve karışım sıcaklığı ile karışım difüzyon katsayısı istenen bileşen CREK'ten alınır,
- CREK'ten gelen, karışımı oluşturan bileşenlere ait gerekli dataların TRCOEFF.DAT dosyasında bulunup bulunmadığını kontrol eder,
- Bulunan bileşenler için ε/κ ve σ değerlerinin ataması yapılır,
- Karışım sıcaklığına bağlı olarak, indirgenmiş sıcaklık ve buna bağlı olarak da çarpışma integralleri (Ω_D), daha önce oluşturulmuş bir polinoma göre hesaplanır.
- Karışım difüzyon katsayısı istenen bileşen ile diğer bileşenlerin ikili difüzyon katsayıları, teker teker hesaplanır.
- İstenen bileşen için karışım difüzyon katsayısı hesaplanır.
- Ana programa dönülür.

Burada da çarpışma integralleri, indirgenmiş sıcaklığa bağlı olarak Bölüm (4.3)'de anlatıldığı şekilde hesaplandığından detayları burada anlatılmamıştır. Difüzyon katsayısı için çarpışma integrali (Ω_D) değerleri ile indirgenmiş sıcaklık arasındaki ilişki, burada da polinomlara uydurulmuş, bu polinomlara ait katsayılar DIFFCOEF alt programı içinde bir FUNCTION alt programı içinde kullanılmıştır.

4.5 Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Yanma olaylarında karşılaşılan başlıca bileşenlerin ısı iletim katsayıları ve vizkozite değerleri, sıcaklığa bağlı olarak, CONDVISC alt programı ile hesaplanmış ve literatürde verilen değerlerle karşılaştırılmıştır (Tablo 4.1). Tablo 4.1'den görüldüğü gibi; CH₄, CO₂, C₂H₆ ve H₂ için sıcaklık yükseldikçe hata oranı artmaktadır. H₂O'da ise durum tersinedir. Bu da sıcaklık yükseldikçe su buharının, gaz davranışına daha iyi uyduğunun bir göstergesidir. Diğer gazlara ait hata oranları sıcaklıkla fazla değişmemektedirler. Sonuçların, mühendislik hesaplamaları için yeterli hassasiyette oldukları söylenebilir. İki den daha fazla bileşen içeren karışımlara ait deneysel veriler, doğrudan bulunamamıştır. Ancak Tseederberg (1965) H₂O,

Tablo 4-1

Geliştirilen CONDVISC alt programı ile hesaplanan, bazı gazlara ait ısı iletim katsayılarının (λ), değişik sıcaklıklar için, literatürde bulunan değerlerle karşılaştırılması.

Gaz adı (Sembolü)	Sıcaklık (K)	Literatür $\times 10^{-3}$ W/(m·K)	CONDVISC $\times 10^{-3}$ W/(m·K)	% HATA
Argon (A)	300.00	17.70	18.09	2.16
	600.00	30.70	30.63	-0.23
	900.00	40.60	40.32	-0.69
	1200.00	49.00	48.92	-0.16
Metan (CH ₄)	300.00	34.20	32.63	-4.80
	600.00	85.20	75.84	-12.34
	700.00	104.60	91.68	-14.09
Karbonmonoksit (CO)	300.00	25.00	25.03	0.14
	600.00	44.00	42.29	-4.04
	800.00	55.50	53.11	-4.50
Karbondioksit (CO ₂)	300.00	16.60	16.36	-1.45
	600.00	40.70	36.63	-11.10
	900.00	61.80	54.79	-12.79
	1200.00	80.00	70.46	-13.54
Etan (C ₂ H ₆)	300.00	21.50	19.71	-9.09
	450.00	43.60	37.44	-16.45
Oksijen (O ₂)	300.00	26.60	25.68	-3.60
	600.00	47.30	45.17	-4.71
	900.00	64.90	62.62	-3.64
	1200.00	82.00	77.91	-5.25
Hidrojen (H ₂)	300.00	183.00	175.06	-4.54
	600.00	305.00	280.89	-8.58
	900.00	412.00	366.42	-12.44
	1200.00	528.00	454.29	-16.23
Su buharı (H ₂ O)	400.00	26.60	35.62	25.33
	600.00	46.30	55.70	16.87
	900.00	84.10	90.53	7.10
Azot (N ₂)	300.00	25.90	25.47	-1.69
	600.00	44.60	42.67	-4.52
	900.00	59.70	58.86	-1.43
	1200.00	76.00	73.99	-2.71

* : CO'a ait değerler, Incropera and De Witt (1990)'dan, diğer gazlar için değerler de Perry and Chilton (1973)'dan alınmıştır.

NOT: Perry and Chilton (1973)'dan değerlerin alındığı, sayfa 3-215'deki Table 3-285'de ısı iletim katsayısının birimi W/(m·K) olarak verilmiştir. Ancak bu birimin W/(cm·K) olması gerekmektedir (M. E.).

C₂H₂, CO ve CH₄'ın hava ile ayrı ayrı karışımlarına ait deneysel değerler vermektedir. Burada havanın, %79 N₂ + %21 O₂ olduğundan hareketle, anılan gazlarla N₂ ve O₂'nin üçlü karışım oluşturdıkları düşünülerek hesap yapılmış, sonuçler deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Tablo 4.2'de verilmiş olan sonuçlardan da görülebileceği gibi, sonuçların yeterli hassasiyette olduğu söylenebilir.

Tablo 4.2

Bazı üç bileşenli gaz karışımları için ısı iletim katsayılarının CONDVISC alt programı ile hesaplanan değerlerinin deneysel değerlerle karşılaştırılması

Karışımı oluşturan gazlar (Sıcaklık) T (K)	İlk bileşenin % oranı	Karışım içinde havadan gelen bileşenlerin % oranları		Isı iletim katsayısı W/(m.K)		% HATA
		O ₂	N ₂	Deneysel değerler (1)	CONDVISC ile hesaplanan	
H ₂ O-Air (353)	0.1970	0.1687	0.6343	0.02992	0.02850	-4.73
	0.3060	0.1458	0.5482	0.02961	0.02869	-3.12
	0.4440	0.1168	0.4392	0.02885	0.02902	0.60
	0.5190	0.1011	0.3799	0.02814	0.02924	3.92
C ₂ H ₂ -Air (293)	0.1410	0.1805	0.6785	0.02494	0.02355	-5.58
	0.3200	0.1429	0.5371	0.02442	0.02264	-7.28
	0.5360	0.0975	0.3665	0.02370	0.02192	-7.50
	0.6300	0.0777	0.2923	0.02322	0.02172	-6.46
C ₂ H ₂ -Air (338)	0.9000	0.0210	0.0790	0.02218	0.02144	-3.32
	0.2110	0.1658	0.6232	0.02829	0.02629	-7.06
	0.4640	0.1126	0.4234	0.02785	0.02560	-8.07
	0.6460	0.0744	0.2796	0.02751	0.02544	-7.52
CO-Air (291)	0.8210	0.0376	0.1414	0.02686	0.02547	-5.17
	0.1080	0.1874	0.7046	0.02491	0.02416	-3.00
	0.3210	0.1426	0.5364	0.02467	0.02386	-3.30
	0.5620	0.0920	0.3460	0.02438	0.02380	-2.39
CH ₄ -Air (295)	0.9780	0.0046	0.0174	0.02380	0.02440	2.51
	0.0760	0.1941	0.7299	0.02563	0.02506	-2.21
	0.3900	0.1282	0.4818	0.02717	0.02695	-0.82
	0.7000	0.0630	0.2370	0.02874	0.02926	1.80
	0.8800	0.0252	0.0948	0.02961	0.03081	4.04

(1) : Tsederberg (1965).

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'deki yüzde hata değerleri,

$$\%HATA = \frac{\lambda_{hesap} - \lambda_{deney}}{\lambda_{hesap}} \times 100$$

İkili gaz karışımları için difüzyon katsayılarının hesaplanan ve literatürde bulunan deneysel değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir. Tablo 4.3’den görüldüğü gibi sonuçlar mühendislik hesaplamaları için yeterli hassasiyettedirler.

Tablo 4.3

Gaz çiftlerinin ikili difüzyon katsayısını (D_{ij}) hesaplamak amacıyla geliştirilen DIFFCOEF alt programının verdiği sonuçların deneysel verilerle kıyaslanması.

Gaz çifti	T (K)	D_{ij} Deneysel değerler (cm^2/s)	D_{ij} TRC-DIFF sonucu (cm^2/s)	% HATA**	Deney Ref.
A - CO ₂	276.20	0.133	0.124	-7.26	2
A - CH ₄	298.00	0.202	0.216	6.48	2
A - He	273.15	0.641	0.642	0.16	1
A - He	298.00	0.729	0.811	10.11	2
A - H ₂	242.20	0.562	0.560	-0.36	2
A - H ₂	488.00	1.760	1.859	5.33	2
A - H ₂	1069.00	8.100	6.942	-16.68	2
A - N ₂	293.15	0.194	0.192	-1.04	1
CH ₄ - H ₂ O	352.30	0.356	0.322	-10.56	2
CH ₄ - O ₂	773.15	1.100	1.166	5.66	1
CO - CO ₂	273.15	0.137	0.131	-4.58	1
CO - C ₂ H ₄	273.15	0.116	0.133	12.78	1
CO - H ₂	273.15	0.651	0.659	1.21	1
CO - N ₂	373.00	0.318	0.303	-4.95	2
CO - O ₂	273.15	0.185	0.176	-5.11	1
CO - O ₂	723.15	1.000	0.936	-6.84	1
CO ₂ - CH ₄	273.15	0.153	0.143	-6.99	1
CO ₂ - He	298.00	0.612	0.610	-0.33	2
CO ₂ - H ₂	273.15	0.550	0.563	2.31	1
CO ₂ - H ₂ O	307.20	0.198	0.174	-13.79	2
CO ₂ - H ₂ O	352.30	0.245	0.230	-6.52	2
CO ₂ - N ₂	293.15	0.163	0.151	-7.95	1
CO ₂ - N ₂	298.00	0.167	0.156	-7.05	2
CO ₂ - N ₂ O	273.15	0.096	0.092	-4.35	1
CO ₂ - O ₂	273.15	0.139	0.130	-6.92	1
CO ₂ - O ₂	773.15	0.900	0.834	-7.91	1
CO ₂ - O ₂	293.20	0.153	0.149	-2.68	2
He - CH ₄	298.00	0.675	0.690	2.17	2
He - H ₂ O	307.10	0.902	0.938	3.84	2
He - N ₂	298.00	0.687	0.711	3.38	2

Tablo 4.3 (Devam ediyor)

Gaz çiftlerinin ikili diffüzyon katsayısını (D_{ij}) hesaplamak amacıyla geliştirilen TRC-DIFF alt programının verdiği sonuçların deneysel verilerle kıyaslanması.

Gaz çifti	T (K)	D_{ij} Deneysel değerler (cm ² /s)	D_{ij} DIFFCOEF sonucu (cm ² /s)	% HATA**	Deney Ref.
He - O ₂	298.00	0.729	0.737	1.09	2
H ₂ - CH ₄	273.15	0.625	0.628	0.48	1
H ₂ - CH ₄	288.00	0.694	0.691	-0.43	2
H ₂ - CO ₂	273.15	0.550	0.563	2.31	1
H ₂ - CO ₂	298.15	0.646	0.654	1.22	1
H ₂ - C ₂ H ₄	273.15	0.486	0.527	7.78	1
H ₂ - C ₂ H ₄	298.15	0.726	0.613	-18.43	1
H ₂ - C ₂ H ₆	273.15	0.459	0.485	5.36	1
H ₂ - C ₂ H ₆	298.15	0.537	0.564	4.79	1
H ₂ - H ₂ O	328.50	1.121	1.043	-7.48	2
H ₂ - N ₂	273.15	0.674	0.665	-1.35	1
H ₂ - N ₂	298.00	0.784	0.770	-1.82	2
H ₂ - N ₂	573.00	2.147	2.319	7.42	2
H ₂ - N ₂ O	273.15	0.535	0.555	3.60	1
H ₂ - O ₂	273.15	0.697	0.693	-0.58	1
H ₂ - O ₂	773.15	4.200	4.000	-5.00	1
H ₂ O - CO ₂	273.15	0.138	0.137	-0.73	1
H ₂ O - H ₂	273.15	0.750	0.738	-1.63	1
H ₂ O - O ₂	723.15	1.300	1.212	-7.26	1
NO - CO ₂	273.15	0.096	0.129	25.58	1
NO - H ₂	273.15	0.535	0.664	19.43	1
N ₂ - CO ₂	298.15	0.165	0.156	-5.77	1
N ₂ - C ₂ H ₄	298.15	0.163	0.159	-2.52	1
N ₂ - C ₂ H ₆	298.15	0.148	0.146	-1.37	1
N ₂ - He	293.15	0.705	0.691	-2.03	1
N ₂ - H ₂ O	307.50	0.256	0.245	-4.49	2
N ₂ - H ₂ O	352.10	0.256	0.317	19.24	2
N ₂ - O ₂	273.15	0.181	0.178	-1.69	1
O ₂ - CO ₂	273.15	0.139	0.130	-6.92	1
O ₂ - H ₂	273.15	0.697	0.693	-0.58	1
O ₂ - H ₂ O	352.30	0.352	0.321	-9.66	2
O ₂ - N ₂	273.15	0.181	0.178	-1.69	1

$$** : \%HATA = \frac{D_{hesap} - D_{deney}}{D_{hesap}} \times 100$$

Ref. : 1) Perry and Chilton (1973).
2) Ekinici (1983).

5. ŞOK TÜPÜ İLE DENEYSEL ÇALIŞMA

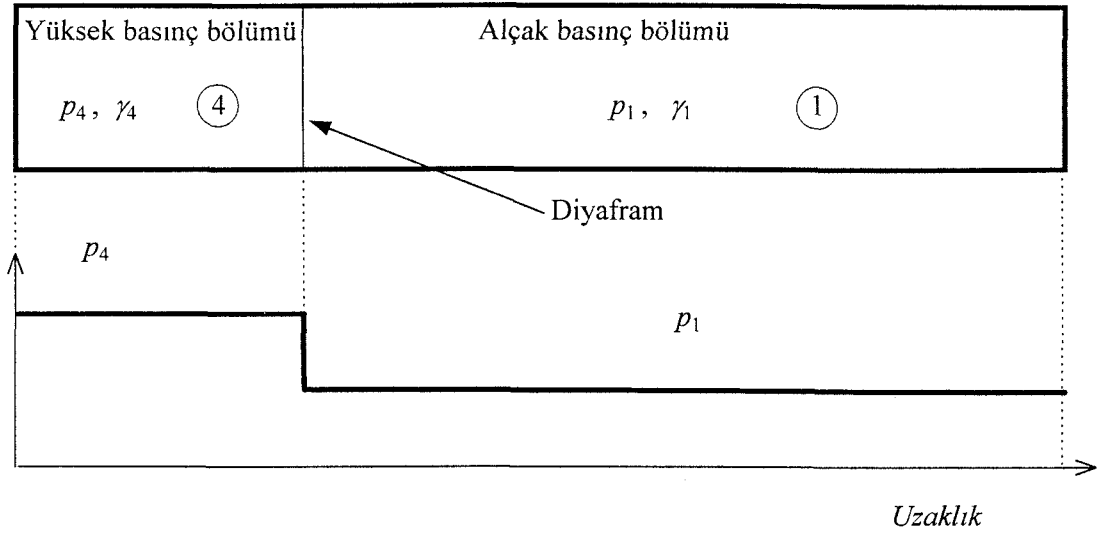
5.1 Giriş

Şok tüpü, yanma, piroliz ve kimyasal kinetik konularında yapılan çalışmalarda vazgeçilmez bir araçtır. Bu çalışma dahilinde, propan yanması için bir reaksiyon mekanizması oluşturulması amacıyla bir şok tüpü deney seti kurulmuş olup, bunun üzerinde deneyler yapılmıştır. Şok tüpü esas olarak, yüksek ve alçak basınçlı gaz içeren kısımları bir diyaframla ayrılmış, dairesel veya değişik kesitli bir borudur. Uygun bir düzenele diyafram ani olarak delindiğinde (patlatıldığında), yüksek basınç altındaki gaz (sürücü gaz), tıpkı bir piston gibi düşük basınçlı gazı (deney gazı) sıkıştırarak, tüpün ucunda gazın sıcaklığını ve basıncını yükseltir. Ulaşılmaya istenen basınç ve sıcaklık değerleri, başlangıçtaki basınçların oranına (p_4/p_1) (Şekil 5.1) ve gaz karışımının termodinamiksel özelliklerine bağlıdır.

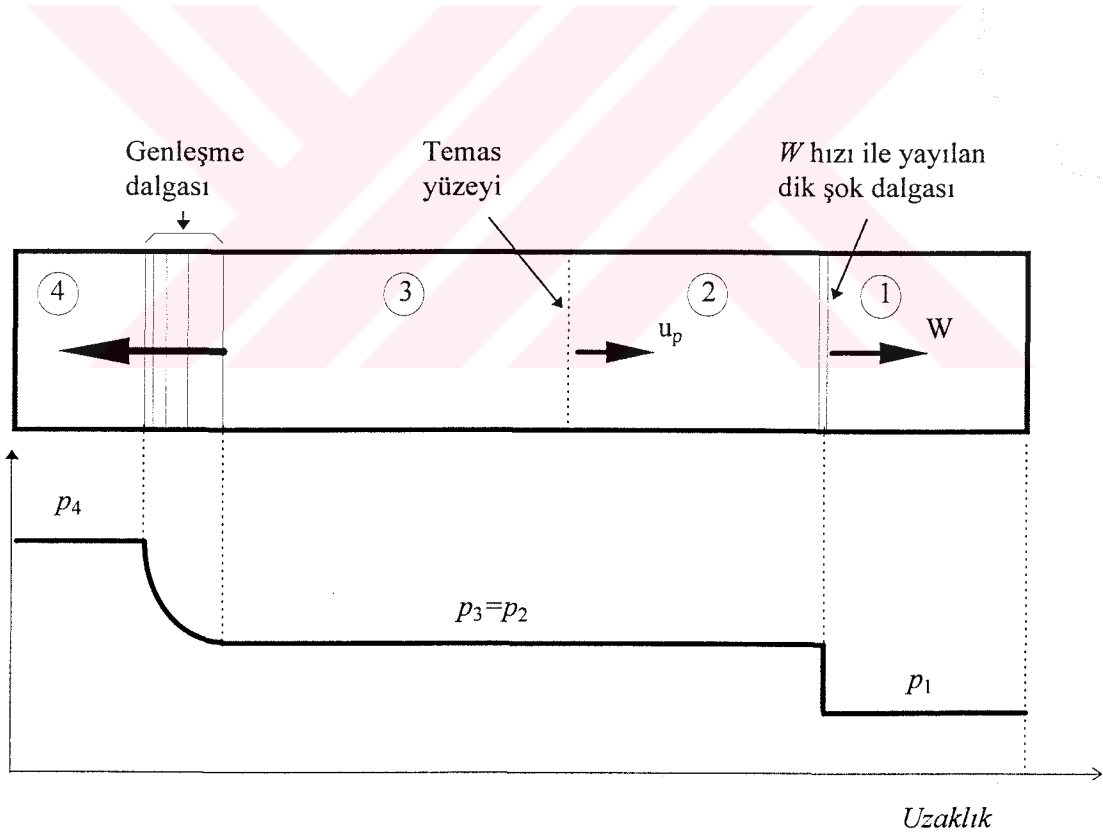
Diyaframın patlatılmasının ardından, yüksek basınç tarafındaki gazın basıncı p_4 'den p_3 'e düşerken (genişleten dalgalar), alçak basınç tarafındaki gazın basıncı da p_1 'den p_3 'e artacaktır (sıkıştıran dalgalar) (Şekil 5.2). Eğer başlangıçtaki basınçların oranı yeterince büyükse, 1 ve 4 kısımlarını ayıran süreksizlik bölgesinin hareket hızı ses hızını geçebilir ve kalınlığı da çok ince olur. Süreksizlik bölgesinin hızına bağlı olarak, Mach sayısı 1.2 ile 3 arasında değerler alıyorsa (White, 1986), bu süreksizlik bölgesi *şok dalgası* olarak adlandırılır.

Şok tüpü ile yapılan deneylerde şok hızı ölçüldükten sonra, buna bağlı diğer büyüklükler hesapla bulunur. Şok hızı, şok cephesinin, şok tüpü üzerine yerleştirilen iki duyarga arasından geçiş süresi kaydedilerek ölçülür. Duyarga olarak piezo-elektriksel basınç duyargaları, ince film direnç termometreleri, foto-elektrik algılayıcılar vs. kullanılabilir. Duyargaların gönderdiği atımlar (pulsar, sinyaller), elektronik sayaçlar veya osiloskoplar vasıtasıyla alınarak, iki duyargadan gelen atımlar arasındaki süre okunur. Duyargalar arasındaki mesafe de deney seti üzerinden ölçülebileceğinden, yol/zaman'dan şok hızı elde edilir. Bu çalışmada, basınç duyargası olarak piezo-elektriksel basınç duyargaları, kaydedici olarak da dijital osiloskop ve buna bağlı bir bilgisayar kullanılmıştır.

Şok tüpü, yanma ile ilgili deneysel çalışmalarda oldukça kullanışlı bir sistemdir. Yanıcı gaz karışımının dış ortamla ilgisinin olmaması, alçak ve yüksek basınç değerlerini değiştirerek,



Şekil 5.1 Şok tüpünde başlangıç koşulları.



Şekil 5.2 Şok tüpünde, diyaframın patlatılmasından sonra oluşan akımlar.

karışımındaki yakıt/hava oranı ne olursa olsun istenen sıcaklıklara çıkılabilmesi sistemin avantajlarıdır. Bunun yanında, tüp içinde gerçekleşen olayın çok hızlı seyretmesi ve dolayısıyla gözlenmesinin zor oluşu ve şok hızını tesbit için pahalı araç-gereç gerektirmesi ise bir dezavantaj olarak belirmektedir.

5.2 Deney Düzeneginin Tanıtılması ve Deneylerin Yapılması

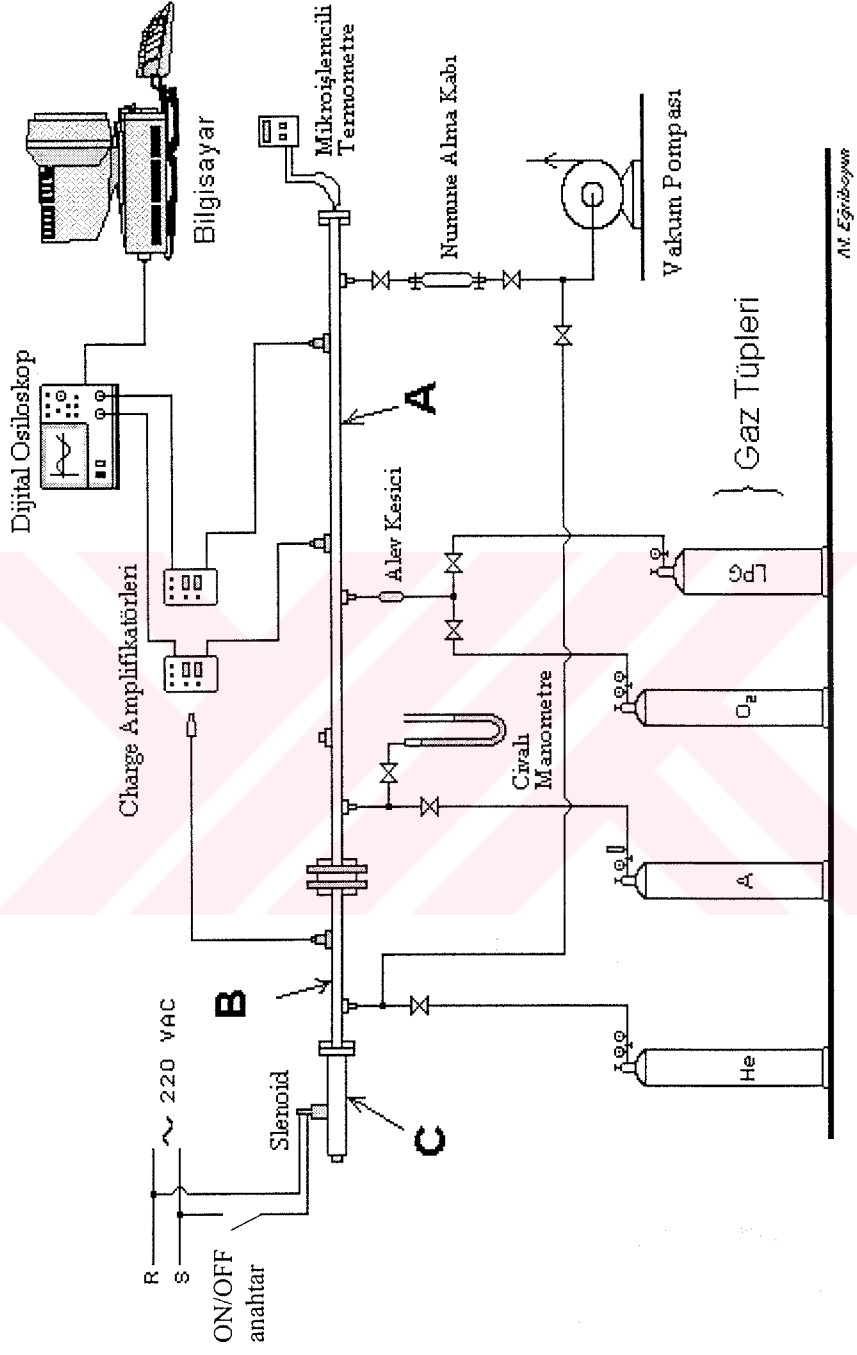
Propan yanmasının incelenmesi amacıyla şok tüpünde deneyler yapılması planlanmış ve bir deney düzeneği kurulmuştur. Şekil 5.3’de şematik olarak gösterilen deney düzeneği imalatı, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü atölyelerinde ve İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şok tüpünün boyutlandırılması ve diyafram patlatma düzeneğinin dizaynı, (Glass ve Hall, 1959)’da verilen bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Şok tüpü, 25.4 mm (1 inç) iç çapında, cidar kalınlığı 3 mm olan dikişsiz çelik borudan imal edilmiştir. Diyaframdan sağ uca kadar (Şekil 5.3), alçak basınç tarafı 1257 mm, yüksek basınç tarafı 280 mm’dir. Gaz bağlantı devrelerinin kurulmasında eski bir gaz analiz cihazından sökülen, boru, çek valf, vana ve armatürler kullanılmıştır. Alev geri tepmesi riskine karşı, yanıcı gaz girişine alev kesici konulmuştur. Diyafram malzemesi olarak önce 80 µm kalınlığında alüminyum folyo denenmiş, ancak sonuç alınamamıştır. Bunun yerine, metalize diye tabir edilen 42 µm kalınlığındaki ambalaj kağıtları denenmiş ve bunların 6.5 atm basınç farkına kadar kullanılabilecekleri görülmüştür. Kurulan deney seti ve şok hızı ölçümüne esas deney sonuçlarına ait bazı şekil ve fotoğraflar Şekil 5.4’den 5.9’a kadar verilmiştir.

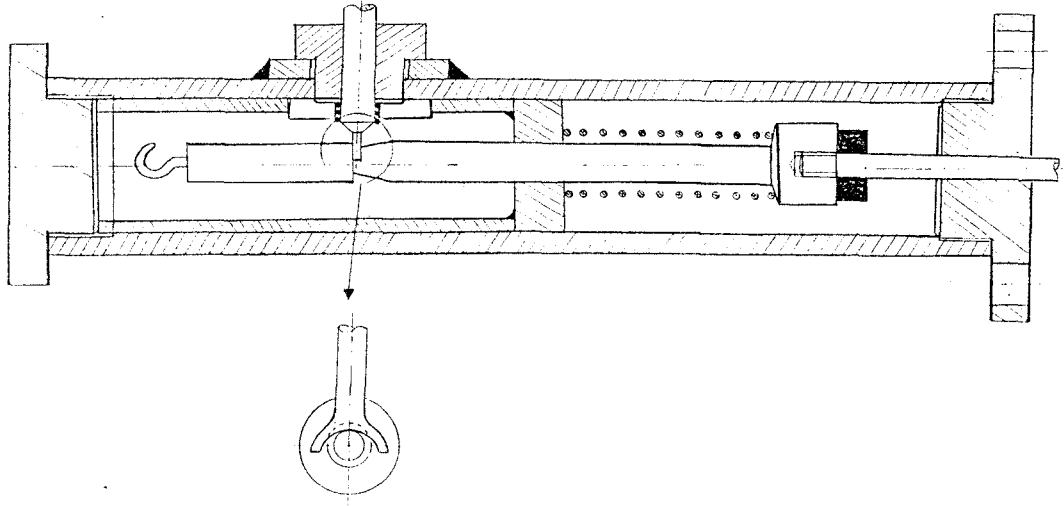
5.2.1 Deney Setini Oluşturan Cihazlar

Basınç duyargaları

Sistemde iki adet Kistler 601 A piezo-elektrik basınç duyargası kullanılmıştır. Duyargalar, $-150 \dots 240$ °C aralığında, $0 \dots 250$ bar arasındaki basınçları ölçebilecek kabiliyettedirler. Yük yükselteçleri (*charge amplifier*) yardımıyla, çalışılan basınca göre üretilen gerilim değerleri ayarlanabilmektedir. Tepki verme süreleri 3 µs, duyarlılığı (sensitivity) ≈ -16 pC/bar, doğrusallıkları (linearity) ise (%FSQ) $< \pm 0.5$ ’dir.

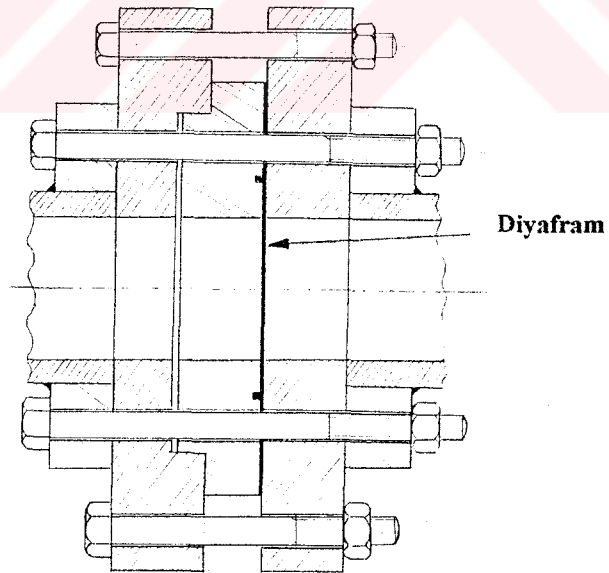


Şekil 5.3 Şok tüpü deney düzeniği.

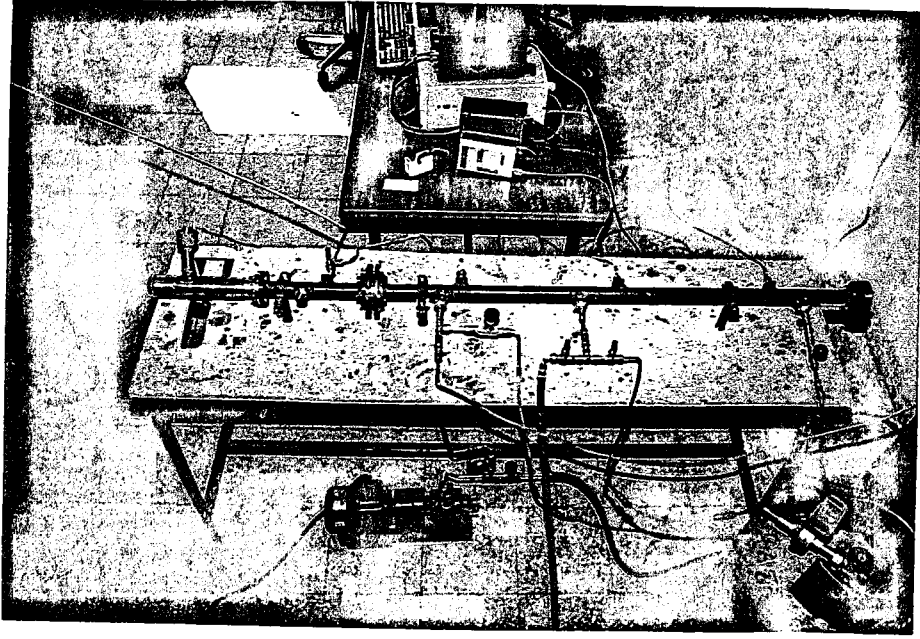


Karşıdan Görünüş

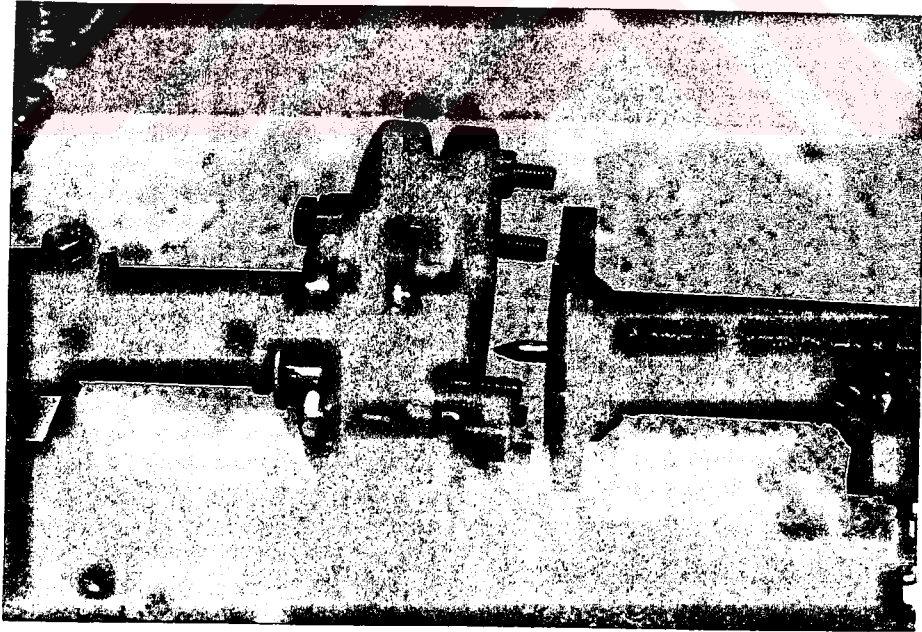
Şekil 5.4 Diyafram delme düzeneği.



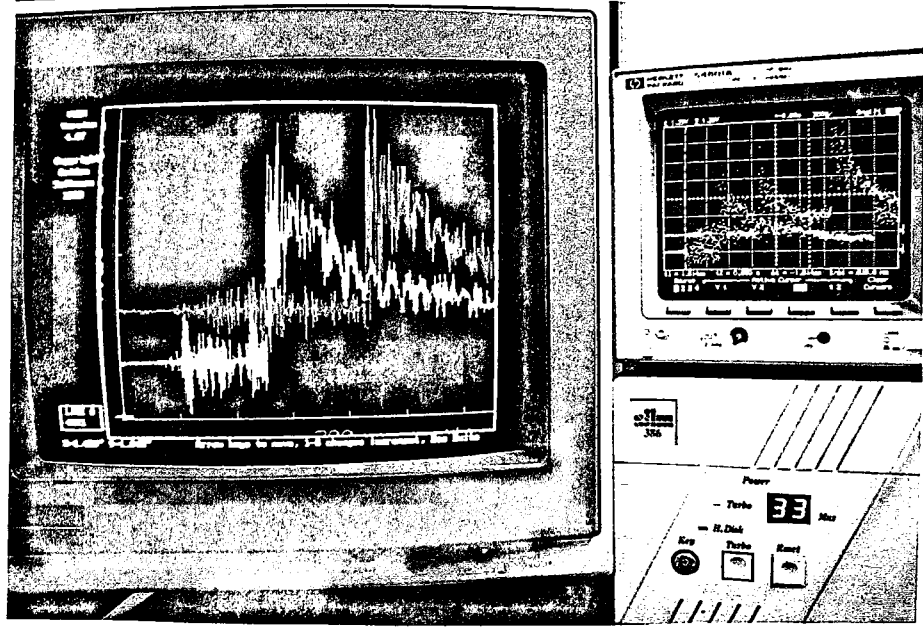
Şekil 5.5 Diyafram tesbit flanşları.



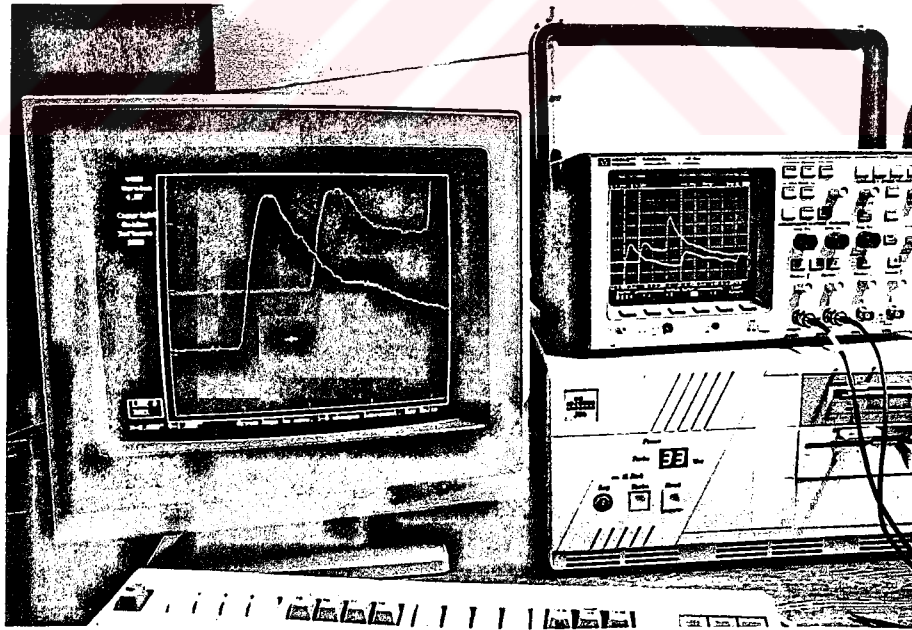
Şekil 5.6 Deney setinin genel görüntüsü



Şekil 5.7 Diyafram delme sistemi



Şekil 5.8 Filtre edilmemiş bir sinyal (Bilgisayar ekranındaki büyütülmüş hali).



Şekil 5.9 Filtre edilmiş (3 kHz) bir sinyal.

Aralarındaki mesafe 401 mm olan duyargalar, borunun iç cidarı ile aynı düzleme gelecek şekilde tüp üzerine monte edilmişlerdir.

Yük yükselteçleri (charge amplifier)

Piezo-elektiksel basınç duyargalarından gelen elektriksel yüke karşı, orantılı olarak, 0-10 volt arasında doğru gerilim üretir. Üretilen gerilimin yüke (basınca) göre değişimi de doğrusaldır. Kistler 5011 yükselteçler kullanılmıştır. Yükselteçler belirli frekanslardaki parazitleri, içlerinde bulunan elektronik filtre devresi ile süzme (filtreleme) işlevine de sahiptirler. Ayrıca duyargaların özelliklerini set etmeye yarayan tuşları ve skala ayar tuşu bulunur.

Dijital osiloskop

2 kanallı (harici tetikleme kanalı hariç), HP 54600 A model dijital osiloskop (100 MHz) kullanılmıştır. Osiloskop, bilgisayara bağlantı imkanı veren, RS-232 C arabirimi içermektedir. Bu sayede osiloskop ayarlarının otomatik olarak bilgisayar tarafından yapılması ve osiloskop tarafından yakalanan bilgilerin bilgisayar ortamına aktarılmaları mümkün olabilmektedir. Osiloskop, yatay ekseninde kanal başına 2000 okuma yapabilmektedir. Osiloskopun tetiklenmesi, harici tetikleme kanalı yerine, birinci kanala bağlı olan basınç duyargası ile yapılmıştır.

Kişisel bilgisayar

Deney sonrasında osiloskop ekranında beliren dalga formlarına ait x-y değerlerini saklamak ve osiloskopu bir yazılım kontrolünde çalıştırmak için bulunmaktadır. IBM uyumlu, 80386 tabanlı, 80387 matematik işlemcili, 20 MHz hızında, 2 MB RAM ve 40 MB hard diske sahip, VGA ekranlı bir bilgisayar kullanılmıştır.

Vakum pompası

0.8 kW gücünde, üç fazlı elektrik motoruyla tahrik edilen, yağlı tip vakum pompası kullanılmıştır. Bu pompa ile -700 mm civa sütunu basınca ($0.08 \text{ atm} = 8.10 \text{ kPa}$) inilebilmektedir.

Gazlar

Deneylerde, alçak basınç kısmında argon+LPG+oksijen karışımı ve yüksek basınç tarafında, sürücü gaz olarak helyum kullanılmıştır. Başlangıçta, sistemi oluşturan elemanlar

arasında uyumlu bir çalışma elde edilinceye kadar, diyaframın her iki tarafında hava bulunması halinde de deneyler yapılmıştır.

Cıvalı U manometre

Alçak basınç tarafındaki basınç cıvalı diferansiyel manometre ile ölçülmüştür. Manometre, 6 mm iç çapında, 1500 mm boyunda iki cam tüpün, saydam bir hortumla, alttan birleştirilmesiyle elde edilmiştir.

Numune alma kabı

Deney sonunda, şok tüpü içindeki gazları alarak gaz kromatografına taşımak için kullanılan numune alma kapları, özel olarak camdan ve iki değişik hacimde imal ettirilmişlerdir. Cam tüplerin iki ucuna kauçuk hortumlar takılmıştır. Gazın dışarıya kaçması, kauçuk hortumların özel mandallarla sıkıştırılması suretiyle engellenmiştir.

Bilgisayar programı

Osiloskopun otomatik ayarlanması, ölçülen şok hızına bağlı olarak, yansıyan şok dalgasının ardındaki basınç ve sıcaklığın hesaplanması, ayrıca deneye ait diğer bilgilerin manyetik ortamda saklanabilmesine imkan tanıyan, Quick Basic dilinde bir bilgisayar programı geliştirilmiştir (Ek-E). Karışımı oluşturan gazların, U manometresinden okunan basınç değerleri ve helyum tüpü üzerindeki manometreden okunan basınç (p_4) değeri ile ortam sıcaklığı, programa kalavyeden girilir. Bu sırada program bir önceki deneye ait değerleri ekranda gösterir. Osiloskopun bilgisayar tarafından kumandasıyla ilgili özel komutlar, kullanım kılavuzundan ve (Kadı, 1992)'dan uyarlanmıştır. Geliştirilmiş olan bilgisayar yazılımı ile bu sinyallere ait datalar otomatik olarak bilgisayara aktarılır ve yine otomatik olarak isimlendirilen bir dosyaya kaydedilerek sabit diskte (hard disk) saklanır. Yazılım, doğrudan GRAPHER paket programına geçiş imkanı sağlayacak şekilde oluşturulmuştur.

5.2.2 Deneylerin Yapılması

Deneyler önce hava-hava çifti ile yapılarak, osiloskop ve duyarga parametrelerinin aralığı ve uygun diyafram malzemesi tesbit edilmiştir. Bu deneyler sırasında yüksek basınçlı hava, atölye tipi seyyar bir kompresörle sağlanmıştır. Sonra yanıcı gaz karışımı ve helyum ile deneylere devam edilmiştir.

Deneylerde alçak basınç (p_1) yaklaşık aynı değerde sabit tutulmuş, buna karşılık yüksek basınç (p_4) değeri değiştirilerek farklı şok hızları elde edilmiştir. Kullanılan basınçlar ve bunlara karşılık elde edilen şok hızları, hesaplanan basınç ve sıcaklıklar Tablo 5.1'de verilmiştir.

Sistem ayarları hava-hava çifti ile yapılan deneyler sonucunda kurulduktan sonra, asıl amacımıza uygun deneylere geçilmiştir. Bundan sonraki herhangi bir deneyde işlem sırası aşağıda verilmiştir:

1) Diyafram, diyafram tesbit tertibatına (Şekil 5.5), bu tertibat da tüp üzerine monte edilir.

2) Tüm gaz giriş vanaları kapatılarak, vakum pompası çalıştırılır. Bu sırada civalı U manometresi ile şok tüpü arasındaki vana açık tutulmalıdır.

3) Yeterince vakum sağlandığında, vakum pompası ile şok tüpü arasındaki vanalar kapatılarak vakum pompası durudurulur. Sonra alçak basınç tarafı tamamen argon, yüksek basınç tarafı ise tamamen helyum gazı ile her iki taraf da atmosfer basıncının üstünde bir basınç elde edilinceye kadar doldurulur. Sonra 2 no.lu işlem yeniden yapılır.

2 ve 3 no.lu işlemler en az iki kere tekrarlanır. Böylece şok tüpünün bölümleri içinde, havadan kaynaklanan yabancı gazlar temizlenmiş olur. Bu işlemler sırasında numune alma kabının her iki ucundaki mandallar açık tutulmalıdır.

4) Tüp içerisinde vakum elde edildikten sonra, vakum pompasının sistemle bağlantıları kapatılır. Numune alma kabının her iki ucundaki mandallar kapatılır.

5) Herbiri ayrı ayrı yapılmak suretiyle, sırasıyla; argon, oksijen ve LPG vanaları açılarak istenen miktarlarda gaz gönderilir. Gaz miktarı U manometresinde civa seviyesindeki değişimin takibi ile tesbit edilir. Yanıcı gaz karışımı ve inert gaz olarak argonunun toplam basıncı (p_1), bütün deneylerde 152 mm civa (Hg) sütunu mertebesinde tutulmuştur. Bunun ardından helyum gazı da istenen p_4 basıncına ulaşıncaya kadar yüklenir. Gazların yükleme işlemi bittiğinde şok tüpü ile çevresi arasındaki bütün vanalar kapatılır. Sistemin çevre sıcaklığı ile ısıl dengeye gelmesi ve deney gazlarının iyice karışması için en az yarım saat beklenir.

6) Bekleme sırasında bilgisayar programı çalıştırılarak, deney gazı miktarları, p_4 basıncı ve mikroışlemcili termometre ile ölçülen çevre sıcaklığı programa veri olarak girilir. Bu aşamadan sonra bilgisayar, osiloskop ve basınç duyargaları hazır beklemektedir.

7) Şekil 5.3'de görülen ON/OFF anahtarı kapatılarak selenoide akım gitmesi sağlanır. Selenoid göbeği çekince, diyafram delici iğne ileri fırlayarak (Şekil 5.4) diyaframı patlatır ve şok dalgası oluşturulmuş olur.

8) Basınç duyargalarının gönderdiği sinyaller osiloskop ekranında belirir. Buradan yada bu sinyallere ait değerlerin bilgisayara aktarılması ile çizilen grafiklerden, şok dalgasının iki duyarga arasından geçiş süresi okunarak, bilgisayar programına girilir.

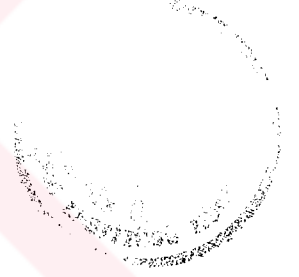
9) Bilgisayar programı, şok hızı, p_5 basıncı, T_5 sıcaklığı, Mach sayısı vs. gibi değerleri hesaplayarak, otomatik olarak oluşturduğu dosyalara kaydeder.

10) Numune alma kabının şok tüpüne yakın tarafındaki mandal açılarak kabın dolması sağlanır. Sonra mandal kapatılarak kap sistemden ayrılır, yerine başka bir kap takılır.

11) Numune gaz kromatografi cihazında analiz edilir.

12) İşlemler baştan itibaren tekrarlanır.

Deneylerde kullanılan basınçlar, yakıt/oksijen eşdeğer oranı ve elde edilen değerler Tablo 5.1'de topluca verilmiştir.



5.3 Şok Dalgası Hızına Bağlı Hesaplamalar

Durma noktası özellikleri dikkate alınarak, eş entropili bir gaz ortamındaki ses hızı ve Mach sayısı için,

$$a_0 = \sqrt{\gamma R T_0} \quad (5.1)$$

$$Ma = \frac{W}{a_0} \quad (5.2)$$

ifadeleri geçerlidir (Anderson, 1990). Burada, a_0 sesin gaz ortam içindeki yayılma hızı, γ ısınma ısıları oranı, R gaz sabiti, T_0 mutlak sıcaklık, Ma Mach sayısı ve W da şok hızıdır.

Şekil 5.3'de görülen deney düzeneğinde, iki basınç duyargası arasındaki uzaklık $l=401$ mm'dir. Şekil 5.10'dan, şok dalgasının birinci ve ikinci duyargalar arasındaki mesafeyi $520 \mu s$ 'de aldığı okunabilmektedir (Δt_1). Bu durumda şok hızı $W=l/\Delta t_1$ formülünden 771.15 m/s olarak hesaplanabilir.

Δt_1 'in osiloskop ekranından okuması pek kolay olmamaktadır. Bu nedenle, sinyallere ait datalar GRAPHER programına aktarılıp, grafikleri büyütülerek çizilmiş ve şok dalgasının iki duyarga arasını geçme süresi buradan okunmuştur. Şekil 5.10'da görülen sinyalin alındığı deneyde, alçak basınç tarafında bulunan gazların cinsleri ve kısmi basınçları sırasıyla; argon=0.862, O_2 =0.105, LPG=0.033 idi. Karışımın gaz sabiti $R=212$ J/(kg.K) ve ısınma ısıları oranı da $\gamma=1.55$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar için karışımın, ideal gazların karışımından meydana geldiği kabul edilmiş ve uygun formüller kullanılmıştır (Çengel and Boles, 1994). Basınç düşük (0.2 atm) olduğundan, bu kabulde bir sakınca görülmemiştir.

Bu değerlerle ses hızı,

$$a_0 = \sqrt{1.55 \cdot 212 \cdot 296} = 312 \text{ m/s}$$

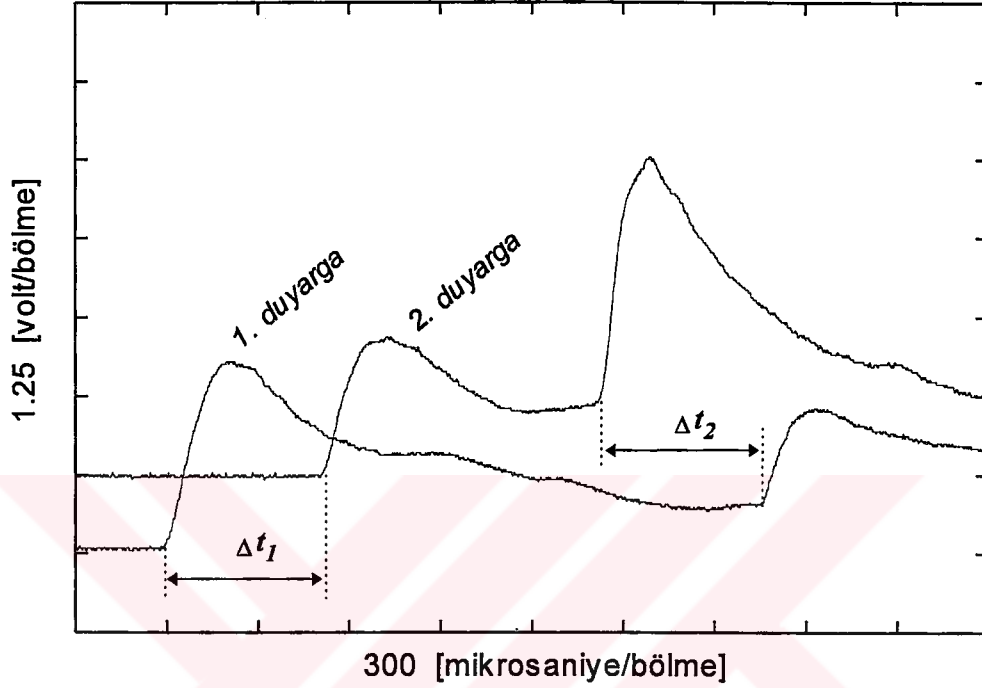
ve Mach sayısı ise,

$$Ma=771.15/312=2.47$$

olarak hesaplanabilir.



Eğer tüpün sağ ucundan yansıyan dalganın hızı hesaplanmak istenirse, şok hızı ifadesinde Δt_1 yerine Δt_2 kullanılmalıdır.



Şekil 5.10 Basınç duyargalarından filtre edilmiş (3 kHz) olarak alınan tipik bir sinyal çifti ve şok dalgasının duyargalar arasında geçirdiği zaman.

Yapılan deneylerde asıl amaç, yanıcı gaz karışımının belli sıcaklığa kadar ısıtılması ve sıcaklıktaki reaksiyon ürünlerinin tesbit edilmesi olduğundan, asıl hesaplanması gereken değerler, yansıyan şok dalgasının ardındaki basınç (p_5) ve sıcaklık (T_5) değerleridir. Bu değerlerin hesaplanmasında gaz dinamiği hakkındaki literatürde verilmiş olan sonuç formülleri kullanılmıştır.

5.4 Sinyallerin Filtrelenmesi

Çevresel faktörler, çok hassas olan basınç duyargalarını olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuzluk duyargalardan alınan sinyallerde parazit olarak belirmektedir. Sinyallerden parazitlerin filtrelenmesi, Δt zaman farklarının hassas olarak okunması için zorunludur.

Filtreleme işi, yük yükselteçleri üzerinden yapılabilir. Ancak önceleri bu yükselteçlerden birinin bulunamayışı nedeniyle Şekil 5.8 ve Şekil 5.11-a'dakine benzer sinyaller alınmıştır. Bunun üzerine, basit bir yaklaşımla, sinyaller filtre edilmeye çalışılmıştır.

Bu yaklaşım, ardarda gelen n tane datanın ortalamasının alınarak tek bir data olarak atanması şeklindedir. Normal olarak osiloskop yatay ekseninde, kanal başına 2000 okuma yapabilmektedir. Örneğin, $n=8$ alındığında, $2000/8=250$ data ile bir sinyal çizilmiş olacaktır. Şekil 5.11-a'daki sinyal 2000 nokta ile çizilmiştir. Aynı sinyalden, $n=16$ alınması durumunda Şekil 5.11-b'deki grafik elde edilmektedir. $n=8$, 16 ve 32 için elde edilen eğriler Şekil 5.11-c'de, aynı eksen takımı üzerinde, çakışık olarak verilmiştir. Buradan da görülmektedir ki, filtreleme için düşünülen yöntem yeterince sağlıklı sonuç vermektedir ve basınçların niceliğinin bilinmesi gerekmeyen durumlarda kullanılabilir. Hesaplamaların hızlı ve güvenilir olması için basit bir bilgisayar programı yazılmıştır.

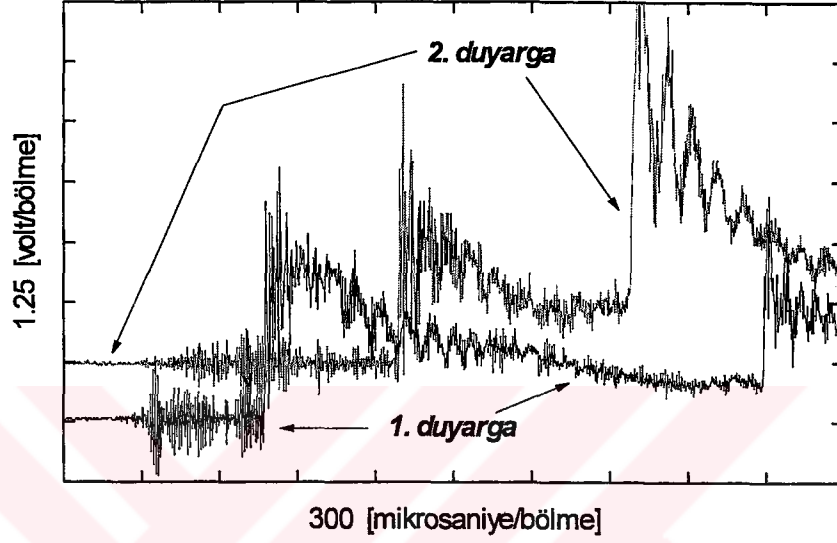
5.5 Sonuçlar

Şok tüpünde yapılan deneylerin asıl amacı propan yanmasını temsil eden bir reaksiyon mekanizması oluşturulması idi. Bu konuda henüz başarılı olunamamıştır.

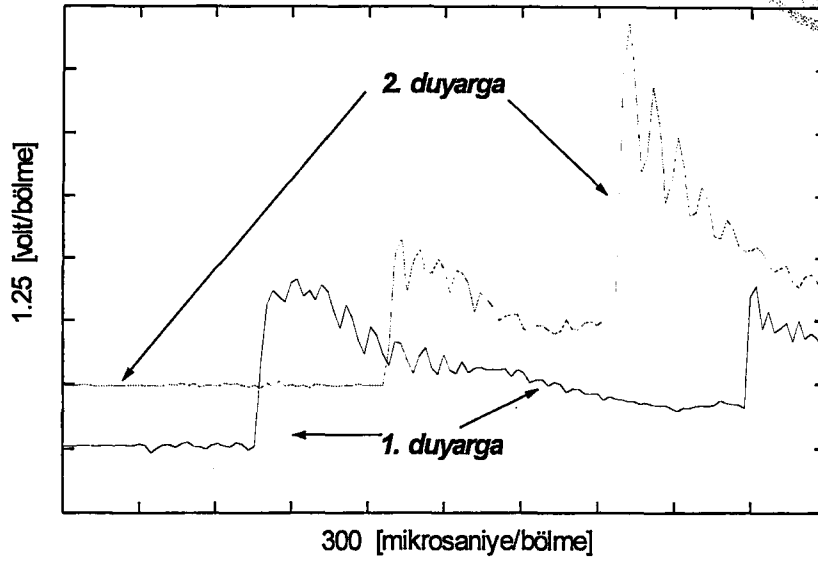
Değişik p_4/p_1 oranları için elde edilen şok hızları ve bunlara bağlı olarak hesaplanan *Mach* sayıları Şekil 5.13'da topluca verilmiştir. Çalışılan aralıkta değişimin doğrusal kaldığı kabul edilebilir. Tablo 5.1'den de görülebileceği gibi bazı basınç oranlarındaki deney sayısı daha çoktur. Ancak bunların herbirinde, gaz karışımındaki bileşen oranları, dolayısıyla şok hızı hesabında önemli bir parametre olan ısınma ısısı oranları değişiktir.

Şok tüpü deneyleri, dijital osiloskop veya sayıcı, hassas duyargalar gibi pahalı teçhizat olmadan sonuç alınması oldukça zor deneylerdir. Örneğin, dijital yerine analog osiloskop kullanıldığı durumda, sisteme ayrıca fotoğraf çekme ünitesi de eklenmelidir. Bu ayrı bir harcama gerektirdiği gibi, her deneyin osiloskop ekranında oluşturduğu izler tespit edilemeyebilir. Bu çalışmada, şok hızı ölçümü için kullanılan cihazlarla, hemen her deneyden, güvenilir sonuçlar alınmıştır.

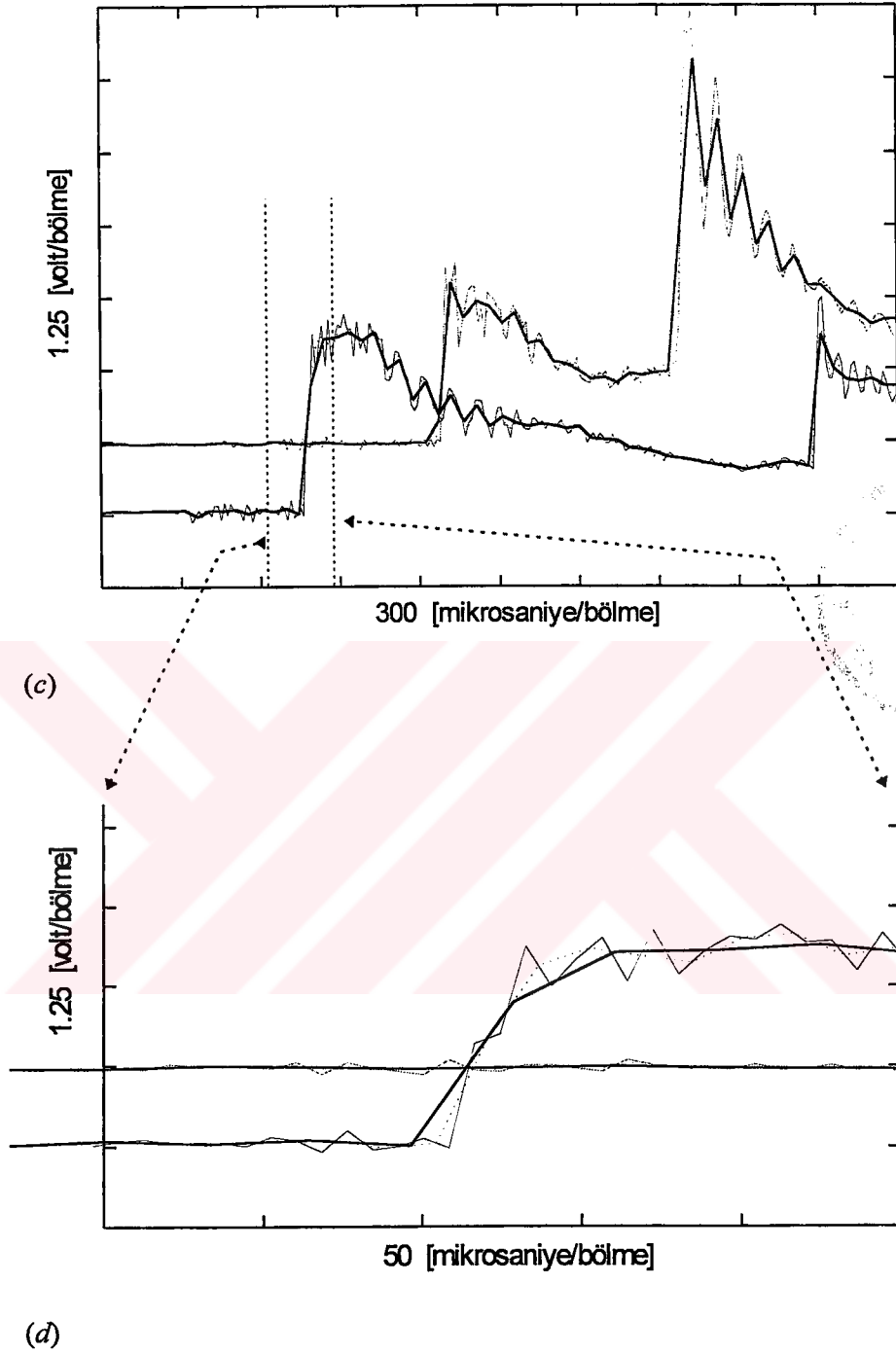
Filtrelemede pahalı yük yükselteçleri olmadan da sonuç alınabileceği görülmüştür. Bu da, basıncın sayısal büyüklüğünün bilinmesi gerekmeyen çalışmalarda para tasarrufu anlamına gelmektedir.



(a)



(b)



Şekil 5.11

8 No.lu deneye ait, sinyallerle yapılan işlemler.

(a) : Sinyalin hiç filtre edilmemiş (osiloskoptan alınan) hali,

(b) : $n=16$ alınarak filtre edilmiş,

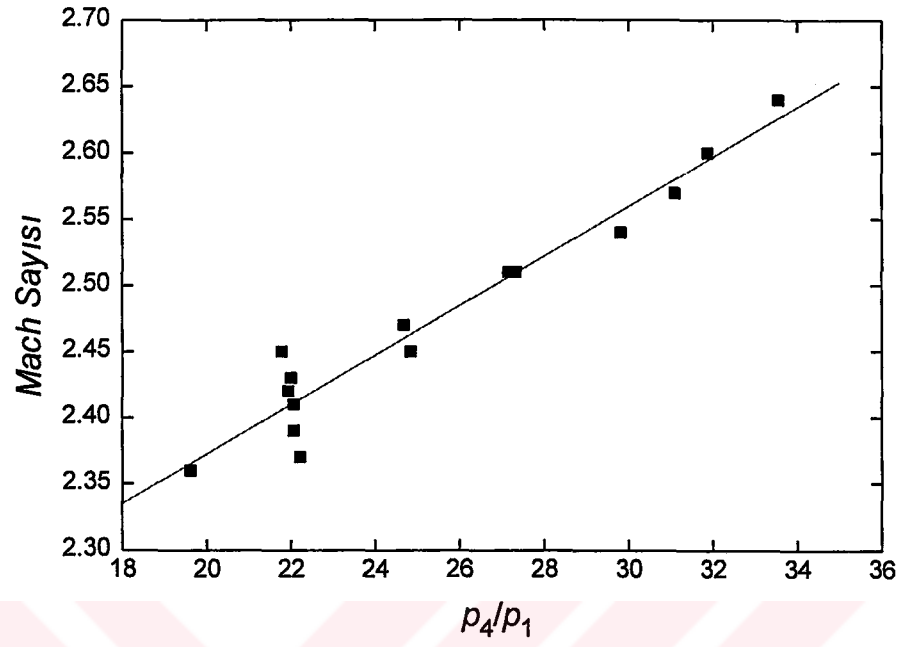
(c) : $n=8$ (İnce çizgi), $n=16$ (noktalı çizgi) ve $n=32$ (kalın çizgi) alınarak filtre edilmiş sinyaller üst üste bindirilmiş olarak,

(d) : (c)'den büyütülmüş bir kısım.

Tablo 5.1 Şok tüpü ile yapılan deneylerde kullanılan basınç, yakıt/oksijen değerleri ile ölçülen ve hesaplanan değerler.

No	Argon mm Hg	LPG mm Hg	O ₂ mmHg	ϕ^*	p_1 mm Hg	p_4 kPa	p_4/p_1	a_0 m/s	W m/s	Ma	p_5 atm	T_5 K
1	132	4	17	1.32	153	450	22.07	314.46	756.60	2.41	5.298	1260
2	132	4	16	1.40	152	450	22.21	313.63	742.59	2.37	5.019	1221
3	131	4	16	1.40	151	500	24.84	313.86	768.20	2.45	5.497	1296
4	131	4	16	1.40	151	550	27.33	313.86	786.27	2.51	5.880	1350
5	131	4	16	1.40	151	600	29.81	313.86	795.63	2.54	6.084	1378
6	133	5	16	1.75	154	450	21.92	312.84	756.60	2.42	5.422	1252
7	131	5	16	1.75	152	500	24.68	312.22	771.15	2.47	5.69	1292
8	131	5	16	1.75	152	550	27.15	312.22	783.20	2.51	5.95	1328
9	131	5	16	1.75	152	630	31.10	312.22	802.00	2.57	6.37	1385
10	131	5	16	1.75	152	680	33.56	312.22	825.10	2.64	6.91	1456
11	130	7	16.5	2.38	153.5	450	21.99	310.17	753.76	2.43	5.501	1220
12	130	7	16	2.45	153	450	22.07	310.13	742.59	2.39	5.248	1190
13	130	7	16	2.45	153	400	19.61	309.35	729.09	2.36	5.01	1152
14	130	7	16	2.45	153	650	31.87	309.35	805.22	2.60	6.69	1368
15	131	8.5	19	2.51	158.5	460	21.77	308.42	756.60	2.45	5.856	1208

* : LPG'nin %60 C₃H₈ + %40 C₄H₁₀ olduğu varsayımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 5.12 Çalışılan aralıkta, başlangıç basınç oranına (p_4/p_1) bağlı olarak *Mach* sayısının değişimi.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada esas olarak metan yanmasında is oluşumu konusu ele alınmıştır. Konunun incelenebilmesi için ön karışımli, laminar düzlemsel bir alevin matematiksel modeli kurulup, sonlu farklar yöntemiyle iteratif olarak çözülmüştür. Bu çözüm için geliştirilmiş olan olan DUZALEV isimli bilgisayar programı, literatürde bulunan CREK programıyla uyumlu çalışacak şekilde kurulmuştur. Ayrıca alev içinde bileşenlerin difüzyon katsayılarını, ısı iletim katsayılarını ve viskozitelerini hesaplamak gerektiğinden, bu işleri yapan birer alt program geliştirilmiştir. Çalışmanın asıl amacına yönelik olarak da SOOT adında bir alt program yapılmıştır. Bu alt program, alev içerisinde, her bir çözüm noktası (nod) için is oluşum hızını, is oksidasyon hızını ve bu değerlerden hareketle oluşan net is miktarını hesaplamaktadır.

Bu çalışma kapsamında metan dışında propanın da yanmasını incelemek amacıyla, bir sok tüpü deney seti kurulmuştur. Bundan, propan yanmasını ifade edebilecek sağlıklı bir reaksiyon mekanizmasının oluşturulması amaçlanmıştır.

Taşınım büyüklüklerini hesaplamak amacıyla geliştirilen bilgisayar programlarının verdiği sonuçlar, mühendislik hesaplamaları için yeterli hassasiyettedirler. Bu sonuçlar, literatürde bulunabilen deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak Bölüm 4.5'de verilmiştir. Tablo 4.1'den görüldüğü gibi, program sonuçları Ar, CO, O₂ ve N₂ gazları için bütün sıcaklık değerlerinde %5'in altında hata vermektedir. H₂O için düşük sıcaklıklarda büyük hata, yüksek sıcaklıklarda küçük hata vermektedir (400 K'de %25.33, 900 K'de %7.1). Bu durum, su buharının sıcaklığı yükseldikçe, ideal gaz davranışına yaklaştığı şeklinde yorumlanabilir. H₂, C₂H₆, CO₂ ve CH₄ gazlarının sonuçlarına bakıldığında, sıcaklık yükselmesiyle hata değerinde negatif yönde bir artış gözlenmektedir. İkili gaz karışımları için de program sonuçları iyidir. Ancak buna ait sonuçlar burada verilmemiştir. Literatürde ikiden fazla bileşen içeren gaz karışımlarına ait deneysel değerler bulunamamıştır. Ancak Tsederberg (1965), çeşitli gazların hava ile değişik oranlarda karışımına ait deneysel değerler vermiştir. Bu gaz+hava karışımları, havanın da %79 N₂+%21 O₂ olduğu dikkate alınarak (hava içindeki CO₂ ve Argonun da hesaba katılmasıyla sonuçların hemen hemen değişmediği görüldükten sonra), üçlü gaz karışımı olarak düşünülmüş ve her bir bileşenin hacim yüzdeleri yeniden hesaplanıp, CONDVISC alt

programına verilerek üçlü karışıma ait ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar oldukça iyidir (Tablo 4.2). En yüksek hata %–8.07 olup, pek çok durumda hata %5'in altındadır. İkili difüzyon katsayıları için yapılan hesaplamalar da genel olarak kabul edilebilir mertebelere (Tablo 4.3).

Bu çalışma kapsamında geliştirilen DUZALEV programı ile, önkarişimli, laminar düzlemsel bir alev içinde, akış eksenini boyunca bileşenlerin dağılımı hesaplanmıştır. Stokiyometrik ve yakıtça zengin ($\Phi=1.25$) alevlere ait bazı sonuçlar Şekil 2.9'dan başlayarak, diğer araştırmacıların çözümleri ve deneysel ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Reaksiyon mekanizması olarak, değişik araştırmacıların verdiği elementer reaksiyonların bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve sonuç üzerinde etkisi az veya ters yönde olan reaksiyonların elenmesiyle oluşturulan yeni bir mekanizma kullanılmıştır. Bu mekanizma 43 elementer reaksiyon ve 24 farklı bileşen içermektedir (Tablo A.2). Sonuçlar açısından bakıldığında, ana bileşenlerin mol oranlarındaki değişim ve final değerleri deneysel değerlere daha yakinken, diğer bileşenler için genel eğilim aynı olmasına karşılık nicelik açısından farklılıklar arz etmektedir. Bunun nedeni reaksiyon mekanizmasını oluşturmada CREK'in getirdiği sınırlamalar olabileceği gibi alevin adyabatik olarak kabul edilmesi de olabilir. Oysa gerçek alev adyabatik olmayıp, ısı taneciklerinin radyasyonu ile çevresine ısı vermektedir. Gerçek bir alevde sıcaklık, ısı kaybından dolayı bir pik noktasından sonra azalmaya başlar. Sunulan modelde ise adyabatik alev sıcaklığında sabit kalmaktadır.

İs oluşumu üzerinde reaktant giriş sıcaklığı ve stokiyometrinin etkileri incelenmiştir. Buna göre sabit reaktant giriş sıcaklığında, yakıt/hava eşdeğer oranı arttıkça oluşan ısı miktarı artmaktadır. Yakıt/hava eşdeğer oranı sabit tutularak reaktant giriş sıcaklığı artırıldığında ise artan sıcaklıkla ısı miktarı azalmaktadır. Bu sonuçlar, literatürde verilen bilgilere genel manasıyla uymaktadırlar. Ayrıca ısı öncüllerinin (özellikle asetilen) pik yeri, alev sıcaklığının pik yeri ve bunu takiben ısı ortaya çıkması gibi (Şekil 3.5) konularda da sonuçlar literatürle uyum içindedir. Ancak burada elde edilen sonuçlar da nicelik olarak değil ancak nitelik olarak anlamlıdır denebilir. Gerçek sonuçlara ulaşmak için ısı formülasyonundaki katsayıların, metan-hava alevi için modifiye edilmeleri gerekmektedir. Bu da ancak, elde tutarlı deneysel sonuçların bulunmasıyla yapılabilir. Yanma ile ilgili deneysel çalışmalar oldukça pahalı araç-gereç gerektiren çalışmalardır. Bilgisayarla yapılan hesaplamalarla, laboratuvarla yapılması gereken deney sayısı azaltılabilir. Böylece hem para hem de zaman tasarrufu sağlanmış olur.

Bu çalışma, alevdeki is radyasyonunu da içerecek şekilde genişletilebilir. Elementer reaksiyon tiplerine sınırlama getirmeden yanma ürünleri hesabı yapabilen bilgisayar programlarının geliştirilmesi, reaksiyon mekanizmalarının kurulmasında hassasiyet analizi yapılması konularında, önü açık bir alandır. Daha ileri aşama olarak da sıvı yakıtların faz değiştirmelerini de içerecek şekilde yanmasının ve bu sırada oluşan is miktarının hesabı konularında çalışılabilir. Ön karışımli, laminar, düzlemsel alevler, alev yapısıyla ilgili araştırmalarda çok kullanışli olmakla beraber, endüstrideki pek çok yanma olayı difüzyon alevi şeklinde gerçekleşmekte olup, türbülanslı yapıdadırlar. Çalışmalar bu yönde de genişletilebilir.



EK - A

Tablo A.1 Metan - hava yanması için geliştirilen reaksiyon mekanizmasında kullanılan ELEMENT, TERMODINAMİK ve REACTANT dataları.

ELEMENTS				
C	12.01115	4.		
H	1.00797	1.		
O	15.9994	-2.		
N	14.0067	0.		
THERMO				
CH4	C 1.H 4.	G 0300.00	5000.00	1
	1.68347883E+00 1.02372356E-02-3.87512864E-06 6.78558487E-10-4.50342312E-14			2
	-1.00807871E+04 9.62339497E+00 7.78741479E-01 1.74766835E-02-2.78340904E-05			3
	3.04970804E-08-1.22393068E-11-9.82522852E+03 1.37221947E+01			4
O2	O 2.	G 0300.00	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
CO2	C 1.O 2.	G 0300.00	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
H2O	H 2.O 1.	G 0300.00	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
CO	C 1.O 1.	G 0300.00	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
H2	H 2.	G 0300.00	5000.00	1
	2.99142337E+00 7.00064411E-04-5.63382869E-08-9.23157818E-12 1.58275179E-15			2
	-8.35033997E+02-1.35511017E+00 3.29812431E+00 8.24944174E-04-8.14301529E-07			3
	-9.47543433E-11 4.13487224E-13-1.01252087E+03-3.29409409E+00			4
OH	O 1.H 1.	G 0300.00	5000.00	1
	2.88273048E+00 1.01397431E-03-2.27687707E-07 2.17468370E-11-5.12630534E-16			2
	3.88688794E+03 5.59571219E+00 3.63726592E+00 1.85091049E-04-1.67616463E-06			3
	2.38720266E-09-8.43144185E-13 3.60678174E+03 1.35886049E+00			4
C2H2	C 2.H 2.	G 0300.00	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
CH2	C 1.H 2.	G 0250.00	4000.00	1
	3.63640785E+00 1.93305663E-03-1.68701632E-07-1.00989939E-10 1.80825576E-14			2
	4.53413398E+04 2.15656066E+00 3.76223707E+00 1.15981908E-03 2.48958543E-07			3
	8.80083562E-10-7.33243544E-13 4.53679063E+04 1.71257758E+00			4
CH2O	C 1.H 2.O 1.	G 0300.00	5000.00	1
	2.99560618E+00 6.68132119E-03-2.62895469E-06 4.73715289E-10-3.21251747E-14			2
	-1.53203691E+04 6.91257238E+00 1.65273118E+00 1.26314387E-02-1.88816848E-05			3
	2.05003143E-08-8.41323712E-12-1.48654043E+04 1.37848196E+01			4
CH3	C 1.H 3.	G 0300.00	5000.00	1
	2.84405160E+00 6.13797410E-03-2.23034522E-06 3.78516080E-10-2.45215903E-14			2
	1.64378086E+04 5.45269728E+00 2.43044281E+00 1.11240987E-02-1.68022034E-05			3
	1.62182872E-08-5.86495262E-12 1.64237813E+04 6.78979397E+00			4

Tablo A.1 Devam ediyor

C2H3	C 2.H 3.	G 0300.00	5000.00	1
5.93346787E+00	4.01774561E-03-3.96673954E-07-1.44126655E-10	2.37864351E-14		2
3.18543457E+04	-8.53031254E+00 2.45927644E+00	7.37147639E-03	2.10987287E-06	3
-1.32164213E-09	-1.18478383E-12 3.33522500E+04	1.15562019E+01		4
C2H4	C 2.H 4.	G 0300.00	5000.00	1
3.52841878E+00	1.14851845E-02-4.41838529E-06	7.84460053E-10-5.26684849E-14		2
4.42828857E+03	2.23038912E+00-8.61487985E-01	2.79616285E-02-3.38867721E-05		3
2.78515220E-08	-9.73787891E-12 5.57304590E+03	2.42114868E+01		4
C2H5	C 2.H 5.	G 0300.00	5000.00	1
7.19048023E+00	6.48407731E-03-6.42806469E-07-2.34787939E-10	3.88087728E-14		2
1.06745488E+04	-1.47808924E+01 2.69070172E+00	8.71913321E-03	4.41983866E-06	3
9.33870314E-10	-3.92777347E-12 1.28704043E+04	1.21381950E+01		4
C2H6	C 2.H 6.	G 0300.00	4000.00	1
4.82593823E+00	1.38404286E-02-4.55725876E-06	6.72496725E-10-3.59816140E-14		2
-1.27177930E+04	-5.23950672E+00 1.46253872E+00	1.54946670E-02	5.78050731E-06	3
-1.25783188E-08	4.58626713E-12-1.12391758E+04	1.44322949E+01		4
H	H 1.	G 0300.00	5000.00	1
2.50000000E+00	0.00000000E+00 0.00000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	2
2.54716270E+04	-4.60117638E-01 2.50000000E+00	0.00000000E+00	0.00000000E+00	3
0.00000000E+00	0.00000000E+00 2.54716270E+04	-4.60117608E-01		4
CHO	C 1.H 1.O 1.	G 0300.00	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
HO2	H 1.O 2.	G 0300.00	5000.00	1
4.07219124E+00	2.13129632E-03-5.30814532E-07	6.11226902E-11-2.84116471E-15		2
-1.57972702E+02	3.47602940E+00 2.97996306E+00	4.99669695E-03-3.79099697E-06		3
2.35419240E-09	-8.08902424E-13 1.76227387E+02	9.22272396E+00		4
O	O 1.	G 0300.00	5000.00	1
2.54205966E+00	-2.75506191E-05-3.10280335E-09	4.55106742E-12-4.36805150E-16		2
2.92308027E+04	4.92030811E+00 2.94642878E+00	-1.63816649E-03	2.42103170E-06	3
-1.60284319E-09	3.89069636E-13 2.91476445E+04	2.96399498E+00		4
N	J 3/61N 1.00 0.00 0.00 0.0	G 300.000	5000.000	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	J 6/63N 1.0 1.00 0.00 0.0	G 300.000	5000.000	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	J 9/64N 1.0 2.00 0.00 0.0	G 300.000	5000.000	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
N2O	J12/64N 2.0 1.00 0.00 0.0	G 300.000	5000.000	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
N2	J 9/65N 2.0 0.0 0.0 0.0	G 300.000	5000.000	1
0.28963194E+01	0.15154863E-02-0.57235275E-06	0.99807385E-10-0.65223536E-14		2
-0.90586182E+03	0.61615143E+01 0.36748257E+01	-0.12081496E-02	0.23240100E-05	3
-0.63217520E-09	-0.22577253E-12-0.10611587E+04	0.23580418E+01		4
REACTANTS-1				
C 1.	H 4.	CH4	1.75 M	G
O 2.		O2	2.00 M	G
N 2.		N2	7.52 M	G

Tablo A.2 Metan Yanması İçin Geliştirilen Reaksiyon Mekanizması ve Hız Verileri.
(43 Reaksiyon, 24 Bileşen)

$$\text{İleri reaksiyon hızı} : k_f = AT^n \exp(T_a/T)$$

Birimler, J, mol, cm³, saniye, K

REAKSİYONLAR					LogA	n	T _a	Kaynak*
H	HO2		OH	OH	14.146	0.000	540.0	1
H	HO2		O	H2O	13.000	0.000	540.0	1
H	HO2		H2	O2	13.097	0.000	0.0	1
OH	HO2		H2O	O2	12.875	0.000	0.0	1
O	HO2		OH	O2	13.146	0.000	540.0	1
O	HO2		OH	O2	12.097	0.000	0.0	1
H	O	M	OH		16.792	-0.600	0.0	1
OH	OH		O	H2O	12.760	0.000	390.0	1
O	CO	M	CO2		15.732	0.000	2300.0	1
CH4	O		CH3	OH	14.610	0.000	7040.0	1
CH4	OH		CH3	H2O	6.190	2.130	1230.0	1
CH2O	O		CHO	OH	13.260	0.000	1550.0	1
CH2O	H		CHO	H2	14.520	0.000	5290.0	1
CH2O	OH		CHO	H2O	12.880	0.000	72.0	1
CHO	O2		CO	HO2	12.477	0.000	0.0	1
CHO	OH		CO	H2O	12.699	0.000	0.0	1
CHO	O		CO	OH	13.000	0.000	0.0	1
CH2O	CH3		CHO	CH4	13.348	0.000	2590.0	1
CH3	OH		CH2O	H2	12.600	0.000	0.0	1
CH3	HO2		CH4	O2	12.009	0.000	200.0	1
C2H6	O		C2H5	OH	13.400	0.000	3200.0	1
C2H6	H		C2H5	H2	2.699	3.500	2620.0	1
C2H6	OH		C2H5	H2O	13.822	0.000	675.0	1
C2H5	H		CH3	CH3	13.572	0.000	0.0	1
C2H5	O2		C2H4	HO2	12.185	0.000	2446.0	1
C2H4	O		CH2	CH2O	13.403	0.000	2516.0	1
C2H4	OH		CH2O	CH3	13.699	0.000	3020.0	1
C2H4	O		C2H3	OH	13.403	0.000	2516.0	1
C2H4	O2		C2H3	HO2	15.130	0.000	27680.0	1
C2H4	H		C2H3	H2	15.301	0.000	10000.0	1
C2H4	OH		C2H3	H2O	14.643	0.000	3720.0	1
C2H3	M		C2H2	H	16.479	0.000	20380.0	1
C2H3	O2		C2H2	HO2	13.196	0.000	5030.0	1
C2H3	H		C2H2	H2	13.877	0.000	0.0	1
C2H3	OH		C2H2	H2O	13.000	0.000	0.0	1
C2H2	OH		CH3	CO	13.739	0.000	6890.0	1
CH3	H		CH2	H2	11.301	0.700	-1500.0	1
OH	N		H	NO	8.778	0.500	4028.0	2
H	N2O		OH	N2	10.903	0.000	7553.0	2
N	NO		N2	O	10.1760	0.000	0.0	2
N	O2		NO	O	6.778	1.000	3172.0	2
N2O	O		NO	NO	11.000	0.000	15000.0	2
N2O		M	N2	O	11.000	0.000	25176.0	2

* : (1) : Coffee (1980)
(2) : Pratt and Wormeck (1976)

Tablo A.3

TRCOEFF.DAT dosyası (Göğüş, 1992'den alınmıştır.)

BİLEŞEN	ε/k [K]	σ [nm]	μ	α	Zort
Ar	136.5000	0.3330	0.0000	0.0000	0.0000
C2H	209.0000	0.4100	0.0000	0.0000	2.5000
C2H2	209.0000	0.4100	0.0000	0.0000	2.5000
C2H2OH	224.7000	0.4162	0.0000	0.0000	1.0000
C2H3	209.0000	0.4100	0.0000	0.0000	1.0000
C2H4	280.8000	0.3971	0.0000	0.0000	1.5000
C2H5	252.3000	0.4302	0.0000	0.0000	1.5000
C2H6	252.3000	0.4302	0.0000	0.0000	1.5000
C2N2	349.0000	0.4361	0.0000	0.0000	1.0000
C3H2	209.0000	0.4100	0.0000	0.0000	1.0000
C3H3	252.0000	0.4760	0.0000	0.0000	1.0000
C3H4	252.0000	0.4760	0.0000	0.0000	1.0000
C3H6	266.8000	0.4982	0.0000	0.0000	1.0000
C3H7	266.8000	0.4982	0.0000	0.0000	1.0000
C7H3	266.8000	0.4982	0.0000	0.0000	1.0000
C3H8	266.8000	0.4982	0.0000	0.0000	1.0000
C4H	357.0000	0.5180	0.0000	0.0000	1.0000
C4H2	357.0000	0.5180	0.0000	0.0000	1.0000
C4H2OH	224.7000	0.4162	0.0000	0.0000	1.0000
C4H3	357.0000	0.5180	0.0000	0.0000	1.0000
C4H4	357.0000	0.5180	0.0000	0.0000	1.0000
C4H8	357.0000	0.5176	0.0000	0.0000	1.0000
C4H9	357.0000	0.5176	0.0000	0.0000	1.0000
CH	80.0000	0.2750	0.0000	0.0000	0.0000
CH2	144.0000	0.3800	0.0000	0.0000	0.0000
CH2CO	436.0000	0.3970	0.0000	0.0000	2.0000
CH2O	498.0000	0.3590	0.0000	0.0000	2.0000
CH3	144.0000	0.3800	0.0000	0.0000	0.0000
CH3CHO	436.0000	0.3970	0.0000	0.0000	2.0000
CH3CO	436.0000	0.3970	0.0000	0.0000	2.0000
CH3O	417.0000	0.3690	1.7000	0.0000	2.0000
CH4	141.4000	0.3746	0.0000	2.6000	13.0000
CH4O	417.0000	0.3690	1.7000	0.0000	2.0000
CN	75.0000	0.3856	0.0000	0.0000	1.0000
CO	98.1000	0.3650	0.0000	1.9500	1.8000
CO2	244.0000	0.3763	0.0000	2.6500	2.1000
H	145.0000	0.2050	0.0000	0.0000	0.0000
H2	38.0000	0.2920	0.0000	0.7900	280.0000
H2O	572.4000	0.2605	1.8440	0.0000	4.0000
H2O2	107.4000	0.3458	0.0000	0.0000	3.8000
H2S	301.0000	0.3600	0.0000	0.0000	1.0000
HFO	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000

(Tablo A.3 Devam ediyor.)

TRCOEFF.DAT dosyası (Göğüş, 1992'den alınmıştır.)

BİLEŞEN	ε/k [K]	σ [nm]	μ	α	Zort
He	10.2000	0.2576	0.0000	0.0000	0.0000
HCCO	150.0000	0.2500	0.0000	0.0000	1.0000
HCN	569.0000	0.3630	0.0000	0.0000	1.0000
HC2N2	349.0000	0.4361	0.0000	0.0000	1.0000
HCO	498.0000	0.3590	0.0000	0.0000	0.0000
HFO	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HF1	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HF2	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HF3	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HF4	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HF5	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HF6	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HF7	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HF8	352.0000	0.2490	1.7300	0.0000	5.0000
HNCO	232.4000	0.3828	0.0000	0.0000	1.0000
HNO	116.7000	0.3492	0.0000	0.0000	1.0000
HNNO	232.4000	0.3828	0.0000	0.0000	1.0000
HO2	107.4000	0.3458	0.0000	0.0000	1.0000
HSO2	252.0000	0.4290	0.0000	0.0000	1.0000
N	71.4000	0.3298	0.0000	0.0000	0.0000
N2	97.5300	0.3621	0.0000	1.7600	4.0000
N2H2	71.4000	0.3798	0.0000	0.0000	1.0000
N2H3	200.0000	0.3900	0.0000	0.0000	1.0000
N2H4	205.0000	0.4230	0.0000	4.2600	1.5000
N2O	232.4000	0.3828	0.0000	0.0000	1.0000
NCO	232.4000	0.3828	0.0000	0.0000	1.0000
NH	80.0000	0.2650	0.0000	0.0000	4.0000
NH2	80.0000	0.2650	0.0000	2.2600	4.0000
NH3	481.0000	0.2920	1.4700	0.0000	10.0000
NNH	71.4000	0.3798	0.0000	0.0000	1.0000
NO	97.5300	0.3621	0.0000	1.7600	4.0000
NO2	200.0000	0.2500	0.0000	0.0000	1.0000
O	80.0000	0.2750	0.0000	0.0000	0.0000
O2	107.4000	0.3458	0.0000	1.6000	3.8000
O3	180.0000	0.4100	0.0000	0.0000	2.0000
OH	80.0000	0.2750	0.0000	0.0000	0.0000
S	847.0000	0.3839	0.0000	0.0000	0.0000
S2	847.0000	0.3900	0.0000	0.0000	1.0000
SH	847.0000	0.3900	0.0000	0.0000	1.0000
SO	301.0000	0.3993	0.0000	0.0000	1.0000
SO2	252.0000	0.4290	0.0000	0.0000	1.0000
SO3	378.4000	0.4175	0.0000	0.0000	1.0000

EK - B

Tablo B.1 Gazların tek tek ve karışım halinde ısı iletim katsayısı ve viskozitelerini hesaplamak amacıyla geliştirilen alt program. Program ayrıca her bir gaz için molar ısınma ısılarını da hesaplamaktadır.

```

C =====
C SUBROUTINE CONDVISC (NOD, TKLAM, ALMIX)
C =====
C
*-----
* PROGRAMLAYAN :
*-----
* MUSTAFA EGRIBOYUN
* ZONGULDAK KARAEELMAS UNIVERSITESI
* MAKINA MUHENDISLIGI BOLUMU
* 67100 ZONGULDAK
*
* REFERENCES :
*-----
* 1) (FORMULASYON) COMBUSTION FUNDAMENTALS
* + ROGER A. STREHLOW
* (DATABASE) MCGRAW-HILL, 2nd PRINTING, 1988
*
* 2) (DATABASE) COMPUTER AIDED COMBUSTION MODELING
* FOR COMPREHENSIVE KINETICS AND
* TRANSPORT IN THE GAS PHASE
* AKIN Y. GOGUS
* Msc. Thesis, METU-1990
*
* PARAMETRELER :
*-----
* !!! NOT : ASAGIDA PARAMETRE ISIMLERININ SONUNDA BULUNAN * T YADA C
* OLABILIR. BUNLARIN ANLAMI DA,
* T : TRCOEFF.DAT ILE ILGILI
* C : CREK ILE ILGILI SEKLINDEDIR.
*
* TSTAR = INDIRGENMIS SICAKLIK (=TK*(K/EPSI))=TK/EPSIK*
* TK = SICAKLIK [K]
* EPSIK* = LENNARD-JONES PARAMETRESI (EPSILON/SICAKLIK) ! BOYUTSUZ
* SIGMA* = MOLEKUL CAPI ! [nm]
* K = BOLTZMAN SABITI (=1.38E-23) ! [J/(molekul.K)]
* OMEGA22 = COLLISION INTEGRAL
* NST = TRCOEFF.DAT'DAKI BILESEN SAYISI
* NS = CREK*.DAT'DAKI BILESEN SAYISI
* RGAS = EVRENSEL GAZ SABITI (=8314.4) ! [joule/(kmol.K)]
* VISCOS = i BILESENI ICIN VISKOZITE ! [kg/(m.s)]
* ALAMDA = i BILESENI ICIN ISI ILETIM KATAYISI ! [j/(m.s.K)]
* CPSPEC = i BILESENI ICIN SABIT BASINCTA ISINMA ISISI ! [joule/(kmol.K)]
* CVSPEC = i " " " " " " ! [joule/(kmol.K)]
* AKAPA = i " " ISINMA ISILARI ORANI ! BOYUTSUZ
* YAZ = HERBIR BILESENE AIT DEGERLERIN YAZILIP YAZILMAMASINI
* SAGLAYAN LOGICAL PARAMETRE
* YAZ=.TRUE. ISE ARA DEGERLER YAZILIR
* YAZ=.FALSE. ISE " " YAZILMAZ
* S2MO(M,I) = I BILESINININ M NODUNDAKI MOL ORANI
*

```

Tablo B.1 (Devam ediyor)

```

* TRCOEFF'I CAGIRAN PROGRAMDA BULUNMASI GEREKEN SATIRLAR :
* LOGICAL YAZ
* COMMON
* &/TTRCOEFF/VISMIX,YAZ,S2MO(N,NS)
* -----
C
  LOGICAL YAZ
  COMMON
  1/CHEMI/CPSUM,FQ,PPLN,RGAS,RGASIN,SMINV,TKINV,TLN,LCONVG,LNRG
  1/CPARAM/ASUB(50,3),EMV,ER,HSUB0,NDEBUG,NS,PA,Q0,Q1,Q2,Q3,Q4,RHOP,
  2 SM,S1(50),S2(50),TK,LADIAB,LDEBUG,LEQUIL,LREACT
  1/CSPECE/H0(50),S0(50),SMW(50),SSAVE(50),Z(7,2,50)
  COMMON
  1/HHCPSP/CPSPEC(50)
  COMMON
  1/TTRCOEFF/VISMIX,YAZ,S2MS(0:100,50),S2MO(0:100,50),Y2KO(0:100,50)
C
  DIMENSION EPSIKT(90),EPSIKC(50),SIGMAT(90),SIGMAC(50)
  DIMENSION SNAMET(90,2)
  DIMENSION VISCOS(50),ALAMDA(50),FI(50,50),CVSPEC(50),AKAPA(50)
  CHARACTER*20 BEGIN
  NST=84
  RGAS=8314.4 ! [joule/(kmolK)]
C
  OPEN (9,FILE='TRCOEF.INP')
  READ (9,25) BEGIN ! BASLIGI OKU
C
  -----
C BILESEN ADI, EPSILON/K VE SIGMA DEGERLERININ OKUNMASI
C -----
C
  DO N=1,NST
  READ (9,20) (SNAMET(N,I),I=1,2),EPSIKT(N),SIGMAT(N)
  END DO
C
  -----
C CREK'TEN GELEN BILESENLERLE TRCOEFF.DAT BILGILERINI ESLEME
C -----
C
  DO NC=1,NS
  DO NT=1,NST
    IF (ASUB(NC,1).EQ.SNAMET(NT,1).AND.ASUB(NC,2).EQ.SNAMET(NT,2))
    & THEN
      EPSIKC(NC)=EPSIKT(NT)
      SIGMAC(NC)=SIGMAT(NT)
    IF (YAZ) THEN
      WRITE (6,17) NC,ASUB(NC,1),ASUB(NC,2),EPSIKC(NC),SIGMAC(NC)
    END IF
    GOTO 903
  ENDIF
  END DO
903 CONTINUE
  IF ((NT-1).EQ.NST) THEN
    EPSIKC(NC)=0.0
    SIGMAC(NC)=0.0
    IF (YAZ) THEN
      WRITE (6,901) NC,ASUB(NC,1),ASUB(NC,2)
    END IF
  
```

Tablo B.1 (Devam ediyor)

```

901  FORMAT (1X,I3,2X,2A4,'BU BILESENE AIT BILGI YOK')
      END IF
      END DO
C    -----
C    HERBIR BILESENE AIT Cp, Cv VE KAPA HESABI
C    -----
      TK=TKLAM
      TKINV=1./TK
      IHCPS=1
      CALL HCPS
      DO N=1,NS
        CPSPEC(N)=CPSPEC(N)*RGAS
        CVSPEC(N)=CPSPEC(N)-RGAS
        AKAPA(N)=CPSPEC(N)/CVSPEC(N)
      IF (YAZ) THEN
        WRITE (6,16) N,ASUB(N,1),ASUB(N,2),CPSPEC(N),CVSPEC(N),AKAPA(N)
      END IF
      END DO
C    -----
C    HER BIR BILESEN ICIN VIZKOZITE VE ISI ILETIM KATSAYISI HESABI
C    -----
      IF (YAZ) THEN
        WRITE (6,29)
        WRITE (6,*) ' TK =',TKLAM
      ENDIF
C
      DO 345 N=1,NS
        IF (EPSIKC(N).EQ.0.0) GOTO 344
        TSTAR=TKLAM/EPSIKC(N)
        TS=TSTAR
C    --- ISI ILETIM KATSAYISI ICIN OMEGA22 HESABI ---
        OMEGA22=OMEGAL(TS)
C    -----
        AA1=SQRT((SMW(N)/1000.)*TK)
        AA2=(SIGMAC(N)**2)*OMEGA22
        VISCOS(N)=8.4411E-7*(AA1/AA2)
        AL1=SQRT(TKLAM/(SMW(N)/1000.))
        AL2=(SIGMAC(N)**2)*OMEGA22
        ALAMMO=2.6330E-05*(AL1/AL2)
        ORAN=AKAPA(N)/(AKAPA(N)-1.)
        ALAMDA(N)=ALAMMO*((1./3.)+(4./15.)*ORAN) ! Chapman-Eskong
C        ALAMDA(N)=ALAMMO*(0.115+(0.354*ORAN)) ! Hirschfelder
C    -----
      IF (YAZ) THEN
        WRITE (6,30) N,ASUB(N,1),ASUB(N,2),S2(N),VISCOS(N),CPSPEC(N),
&          CVSPEC(N),AKAPA(N),ALAMDA(N)
      ENDIF
      GOTO 345
344  CONTINUE
      IF (YAZ) THEN
        WRITE (6,930) N,ASUB(N,1),ASUB(N,2),S2(N),CPSPEC(N),CVSPEC(N),
&          AKAPA(N)
      ENDIF
C

```

Tablo B.1 (Devam ediyor)

```

VISCOS(N)=0.0
ALAMDA(N)=0.0
345 CONTINUE
C -----
C KARISIM ICIN VIZKOZITE VE ISI ILETIM KATSAYISI HESABI
C -----
VISMIX=0.0
ALMIX=0.0
C
DO 333 I=1,NS
IF (S2MO(NOD,I).EQ.0.0) GOTO 333
IF (VISCOS(I).EQ.0.0) GOTO 333
C-----
ALT=0.0
ALTT=0.0
C
DO 444 J=1,NS
IF (J.EQ.I) GOTO 444
IF (S2MO(NOD,J).EQ.0.0) GOTO 444
IF (VISCOS(J).EQ.0.0) GOTO 444
C-----
FF1=1./SQRT(8.)
FF2=1./(SQRT(1.+(SMW(I)/SMW(J))))
FF3=SQRT(VISCOS(I)/VISCOS(J))
FF4=(SMW(J)/SMW(I))**.25
FF5=FF1*FF2
FF6=(1.+(FF3*FF4))**2
FI(I,J)=FF5*FF6
ALT=ALT+(S2MO(NOD,J)*FI(I,J))
444 CONTINUE
ALTV=1.+(1.000/S2MO(NOD,I))*ALT
VISMIX=VISMIX+(VISCOS(I)/ALTV)
C
333 CONTINUE
C
C ERASLAN VE WARTNATZ'DA KULLANILAN FORMULLE KARISIMIN
C ISI ILETIM KATSAYISININ HESABI (DAHA TUTARLI)
C
SON1=0.
SON2=0.
DO 3333 I=1,NS
C IF (S2MO(NOD,I).EQ.0.0) GOTO 3333
SON1=SON1+(S2MO(NOD,I)*ALAMDA(I))
SON2=SON2+(S2MO(NOD,I)/ALAMDA(I))
PRAND=(CPSPEC(I)/SMW(I))*VISCOS(I)/ALAMDA(I)
IF (YAZ) THEN
WRITE (6,129) ASUB(I,1),ASUB(I,2),SMW(I),S2MO(NOD,I),PRAND
END IF
3333 CONTINUE
SON2=1./SON2
ALMIX=0.5*(SON1+SON2)
WRITE (6,2001) TKLAM,ALMIX
2001 FORMAT (1X,'TKLAM = ',F7.0,' K ICIN',/2X,
&'KARISIMIN ISI ILETIM KATSAYISI =',E10.4)

```

Tablo B.1 (Devam ediyor)

```

C -----
C   FORMAT'lar
C -----
17   FORMAT (1X,I3,2X,2A4,3X,'EPSIKC=',F10.3,5X,'SIGMAC=',F8.3)
25   FORMAT (A20)
20   FORMAT (2A4,2X,F9.4,2X,F9.4)
29   FORMAT (' N   SEMBOL           MOL SAY.            $\mu$            Cp           Cv
&      k           I.İ.K. '/'-----'/'           kmol/kg
&-----'/'           '
& kg/m.s           < j/kmol.K >           Cp/Cv           W/m.K           '/'-----'
&-----'
&)
30   FORMAT (I3,1X,2A4,2X,E10.3,3X,E10.3,3X,F8.0,2X,F8.0,2X,F5.3,2X,
&      E10.3)
930  FORMAT (I3,1X,2A4,2X,E10.3,7X,'---',6X,F8.0,2X,F8.0,2X,F5.3,6X,
&      '---')
16   FORMAT (1X,I3,2X,2A4,3X,'Cp=',F10.3,3X,'Cv=',F10.3,3X,'Cp/Cv=',
&F7.4)
129  FORMAT (1X,2A4,3X,'MOL AGIRLIGI =',F7.3,4X,'MOL ORANI =',F5.3,
&      3X,'PRANDTL =',F6.3)
C
99   CLOSE (9)
C
      RETURN
      END

C =====
C   FUNCTION OMEGAL(TSD)
C =====
      TS=TSD
C   --- ISI ILETIM KATSAYISI VE VIZKOZITE ICIN OMEGA22 HESABI ---
      IF (TS.EQ.0.) THEN
C   TSTAR=0.
      OMEGAL=2.8
      ELSEIF ((TS.GT.0.).AND.(TS.LE.5.)) THEN
C   0<TSTAR<=5
      OMEGAL=-0.00107095*TS**7+0.0230863*TS**6-0.208259*TS**5+
&1.02318*TS**4-2.98792*TS**3+5.31356*TS**2-5.64526*TS+4.06827
C   5<TSTAR<=100
      ELSEIF ((TS.GT.5.).AND.(TS.LE.100.)) THEN
      OMEGAL=-4.44376E-13*TS**7+1.76338E-10*TS**6-2.86083E-08*TS**5+
&2.44696E-06*TS**4-0.00011888*TS**3+0.00331625*TS**2-0.053284*TS+
&1.12088
      ELSEIF ((TS.GT.100.).AND.(TS.LE.400.)) THEN
C   100<TSTAR<=400
      OMEGAL=-2.65001E-09*TS**3+2.88E-06*TS**2-0.0012405*TS+0.6861
      END IF
C
      RETURN
      END

```

EK - C

Tablo C.1 Şok tüpü deneylerinde, dijital osiloskopun ayarlanması, osiloskop ekranındaki dalga formuna ait bilgilerin bilgisayara aktarılması ve otomatik olarak saklanması işlemlerini gerçekleştirmek üzere geliştirilen bilgisayar programı.

```

' ANA PROGRAM (S-TUBE.BAS)
' *****
' *-----*
' *
' * PROGRAMI YAPAN :
' * MUSTAFA EYRİBOYUN
' * ZONGULDAK KARAEMLAS ÜNİVERSİTESİ
' * MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
' * MAKİNA MÜH. BÖLÜMÜ
' * 67100 ZONGULDAK
' *
' * Tel : 0-372-2574010 (4 hat) / 1210
' *-----*
' Bu Program,
' -----
' - Osiloskobun ayarlarının yapılması,
' - Osiloskop ekranında görünen dalga formuna ait değerlerin
' bilgisayar ortamına aktarılması,
' - Aktarılan ham değerlerin diske kayıt edilmesi,
' - Ham değerlerin basınç karşılıklarının hesaplanması ve kaydı,
' - Şok dalgasının hızı verildiğinde, yansıyan dalganın gerisindeki
' basınç ve sıcaklıkların hesaplanması ve
' - İstenmesi halinde GRAPHER'e geçiş,
' İşlemlerini gerçekleştir.
' *-----*
' *****
'
' DECLARE SUB OsSetup ()
' DECLARE SUB GetOsiChan2 ()
' DECLARE SUB SaveChan2 (DAD$, AY$)
' DECLARE SUB SinyalToBasinc (Kat!)
' DECLARE SUB Enter (number!)
' DECLARE SUB DosyaAdi (DAD$, AY$, KN, DN)
' DECLARE SUB Isaret (SATIR, KOLON)
' DECLARE SUB Locprints (ne$)
' DECLARE SUB Cerceve (LEFTCOL%, RIGHTCOL%, TOPROW%, BOTTOMROW%)
' DECLARE SUB KismiBasinc (pkAr, pkC3H8, pkO2, pTop)
' DECLARE SUB Giris ()
' DECLARE SUB BasHarfBul (add$, bh$)
' DECLARE SUB DOCASTPar (Stur$, DAD$, AY$, KN!, DN!)
' DECLARE SUB STMach ()
' CONST Left% = 19200, Right% = 19712, Up% = 18432, Down% = 20480, PgUp% =
18688, PgDown% = 20736
' DIM SHARED Preamble1!(10), Preamble2!(10)
' DIM SHARED Waveform1%(2005), Waveform2%(2005)
' DIM SHARED GDat1(2005), GDat2(2005)
' DIM SHARED dat%(5), ARY1%(5), ARY2%(5)
' DIM SHARED lf$

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

COMMON SHARED DAD$, DA$, AY$, DD$, KN, DN
CLS
ON ERROR GOTO 100
CALL Giriş
CALL DosyaAdi(DA$, DD$, KN, DN)
CALL OsSetup
CALL Cerceve(2, 76, 2, 6)
CALL Locprints("OsSetup")
'
25 A$ = INKEY$
IF A$ = CHR$(68) OR A$ = "d" THEN 15 ELSE GOTO 25
15 '
GOTO 99
LOCATE 16, 6: COLOR 11: PRINT " PROGRAMDAN CIKMAK ISTIYOR MUSUNUZ ? (E/H) : "
260 LOCATE 16, 51: COLOR 7: INPUT "", EH$
    IF EH$ = "e" OR EH$ = "E" OR EH$ = "h" OR EH$ = "H" THEN 250 ELSE 260
250 IF EH$ = "e" OR EH$ = "E" THEN 85 ELSE 270
270 LOCATE 16, 6: COLOR 0, 0: PRINT STRING$(60,32):COLOR 7, 0
99
CALL Cerceve(2, 76, 6, 9)
CALL Locprints("GetOsiChan2")
CALL Isaret(5, 5)
CALL GetOsiChan2
CALL Isaret(8, 5)
CALL DOCASTPar(Stur$, DA$, DD$, KN, DN)
CALL Cerceve(2, 76, 9, 14)
CALL Locprints("SaveChan2")
CALL SaveChan2(DAD$, AY$)
CALL Isaret(13, 5)
CALL STMach
COLOR 7, 0
LOCATE 23,1 : COLOR 0, 0: PRINT STRING$(40,32)
LOCATE 23,11: COLOR 10,0: PRINT " GRAPHER'a geçmek istiyor musunuz ? (E/H) : "
60 LOCATE 23, 55: COLOR 7: INPUT "", EH$
    IF EH$ = "e" OR EH$ = "E" OR EH$ = "h" OR EH$ = "H" THEN 50 ELSE 60
50 IF EH$ = "e" OR EH$ = "E" THEN 70 ELSE 85
70 SHELL "GR.BAT": SHELL "EXIT"
85 PRINT
    CALL Locprints("Tamam")
    PRINT
GOTO 1101
100 LOCATE 23, 5: COLOR 0, 7: BEEP: PRINT " Programda hata oluştu "
1101
SHELL "COPY MED.INI C:\*.*": SHELL "EXIT"
SHELL "DEL ARA": SHELL "EXIT"
SYSTEM
END

SUB OsSetup
'-----*
'  BU ALT PROGRAM, OSİLOSKOPUN SET EDİLMESİNİ SAĞLAR.  *
'-----*
PRINT #1, ":channel1:RANGE 10 V"; lf$
    PRINT #1, ":channel1:OFFSET 3.75 V"; lf$

```


Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

      GET #1, , Waveform1%(Count%)
    NEXT Count%
    msg$ = INPUT$(1, #1) ' get the last NL char.
  ' Get the preamble data for the waveform
  PRINT #1, ":waveform:source chan2"; lf$; ' get data from channel 1
  PRINT #1, ":waveform:format word"; lf$; ' get data in 16-bit word format
  PRINT #1, ":waveform:byteorder msbf"; lf$; ' set lsb transferred first
  ' 2.Kanal data ve parametreleri Bilgisayara Aktariliyor
  PRINT #1, ":waveform:preamble?"; lf$; ' ask for preamble informations
  FOR Count% = 1 TO 10 ' get the preambles
    CALL Enter(Preamble2!(Count%))
  NEXT Count%
  ' Get the waveform from the scope in word format
  PRINT #1, ":waveform:data?"; lf$; ' ask for the waveform data
  msg$ = INPUT$(10, #1) ' the arbitrary block header
  FOR Count% = 1 TO length% ' get the waveform
    GET #1, , Waveform2%(Count%)
  NEXT Count%
  msg$ = INPUT$(1, #1) ' get the last NL char.
  ' Asagidaki aritmetik atamalar, ilk ve son degerlerin normal gidis disinda
  ' olmalari nedeniyle konulmustur.
  Waveform1%(1) = Waveform1%(5)
  Waveform2%(1) = Waveform2%(5)
  Waveform1%(2000) = Waveform1%(1999)
  Waveform2%(2000) = Waveform2%(1999)
  FOR Count% = 2 TO length% ' get the waveform
    IF Waveform1%(Count%) <= 0 THEN Waveform1%(Count%) = (Waveform1%(Count% -
      1) + Waveform1%(Count% + 1)) / 2
    IF Waveform2%(Count%) <= 0 THEN Waveform2%(Count%) = (Waveform2%(Count% -
      1) + Waveform2%(Count% + 1)) / 2
  NEXT Count%
  CLOSE #1
END SUB

SUB SaveChan2 (DAD$, AY$)
  '*-----*
  '* BU ALT PROGRAM, OSİLOSKOP EKRANINDAN BİLGİSAYARA AKTARILAN *
  '* BİLGİLERİ DOSYALARA YAZAR. *
  '*-----*
  OPEN DA$ FOR APPEND AS #2
  OPEN DD$ FOR OUTPUT AS #3
  PRINT #2, "YATAY KANAL-1 KANAL-2"
  FOR Count% = 1 TO Preamble1!(3)
    PRINT #2, USING "####"; Count%;
    PRINT #2, USING " ###"; Waveform1%(Count%);
    PRINT #2, USING " ###"; Waveform2%(Count%)
  NEXT Count%
  FOR Count% = 1 TO Preamble1!(3)
    PRINT #3, USING "####"; Count%;
    PRINT #3, USING " ###"; Waveform1%(Count%);
    PRINT #3, USING " ###"; Waveform2%(Count%)
  NEXT Count%
  CLOSE #2
  CLOSE #3
END SUB

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

SUB SinyalToBasinc (Kat)
'-----*
' * BU ALT PROGRAM, SİNYALLERE KARŞILIK BASINÇ DEĞERLERİNİ HESAPLAR. *
'-----*
  MaxV1 = 0: MaxV2 = 0: Min = 100
  C1Bas = 128 * Preamble1!(8) - Preamble1(9)
  C2Bas = 128 * Preamble2!(8) - Preamble2(9)
  FOR i = 1 TO Preamble1!(3)
    GDat1(i) = (Waveform1%(i) * Preamble1!(8) - C1Bas) * TScal1
    GDat2(i) = (Waveform2%(i) * Preamble2!(8) - C2Bas) * TScal2
    IF GDat1(i) > MaxV1 THEN MaxV1 = GDat1(i)
    IF GDat2(i) > MaxV2 THEN MaxV2 = GDat2(i)
    IF GDat1(i) < Min THEN Min = GDat1(i)
  NEXT i
  FOR i = 1 TO Preamble1!(3)
    WHILE GDat1(i) >= .95 * MaxV1
      MaxV1 = GDat1(i)
      K1 = i
    EXIT FOR
  WEND
NEXT i
FOR i = 1 TO Preamble1!(3)
  WHILE GDat2(i) >= .95 * MaxV2
    MaxV2 = GDat2(i)
    K2 = i
  EXIT FOR
WEND
NEXT i
Tim2 = K2 * Preamble1!(5)
Tim1 = K1 * Preamble1!(5)
Dt = ABS(Tim2 - Tim1)
END SUB

SUB Enter (number!)
'*****
' This routine will read a real number from the RS-232 port defined as *
' file #1. Either comma or LF will be treated as delimiter          *
'*****
  quit = 0
  msg$ = ""
  DO
    DO
      Ch$ = INPUT$(1, #1)
      IF Ch$ <> lf$ AND Ch$ <> "," THEN
        msg$ = msg$ + Ch$
      ELSE
        quit = 1
      END IF
    LOOP UNTIL quit = 1
  LOOP UNTIL LEN(msg$) <> 0
  number = VAL(msg$)
END SUB

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

SUB KismiBasinc (pkAr, pkC3H8, pkO2, pTop)
'-----*
' *   BU ALT PROGRAM KISMI BASINÇLARI HESAPLAR   *
'-----*
pTop = pkAr + pkC3H8 + pkO2
pkAr = pkAr / pTop
pkC3H8 = pkC3H8 / pTop
pkO2 = pkO2 / pTop
END SUB

SUB STMach
'-----*
' *   BU ALT PROGRAM, ŞOK TÜPÜ İÇİNDE, DİYAFRAMIN DELİNMESİNDEN SONRA   *
' *   OLUŞAN BASINÇ VE SICAKLIKLARI, ŞOK HIZINA BAĞLI OLARAK HESAPLAR.   *
'-----*
OPEN "ARA" FOR INPUT AS #3
VIEW PRINT 2 TO 23
CLS
  INPUT #3, dosyaadi$
  INPUT #3, pAr
  INPUT #3, pC3H8
  INPUT #3, pO2
  INPUT #3, tem
  OPEN dosyaadi$ FOR APPEND AS #2
' ARGON, PROPAN VE OKSİJEN KARIŞIMINA AİT TERMODİNAMİK ÖZELİKLERİN HESABI
' CP, CV BİRİMLER : J/(mol.K)
  CPAR = 20.79      : CPC3H8 = 73.63      : CPO2 = 29.38
  CVAR = 12.47      : CVC3H8 = 65.32      : CVO2 = 21.07
  WMAR = 39.948     : WMC3H8 = 44.097     : WMO2 = 31.999
CALL Cerceve(11, 53, 2, 9)
  LOCATE 3, 13: PRINT "Ar civa yüksekliği      [mmHg] :"; pAr
  LOCATE 4, 13: PRINT "C3H8 civa yüksekliği    [mmHg] :"; pC3H8
  LOCATE 5, 13: PRINT "O2 civa yüksekliği      [mmHg] :"; pO2
  LOCATE 6, 13: PRINT "Ortam sıcaklığı        [°C] :"; tem
  LOCATE 7, 13: PRINT "P4 basıncı              [kPa] :";
  LOCATE 8, 13: COLOR 11: PRINT "Yaklaşık şok hızı      [mm/µsec] :";
  LOCATE 7, 46: INPUT "", P4
  LOCATE 17, 8: PRINT "Yaklaşık şok hızını, osiloskop ekranından zaman
                    farkını [mikrosaniye] "
  LOCATE 18, 8: PRINT "olarak ölçüp, <duyargalar arası mesafe (=401 mm) /
                    zaman farkı>ndan, "
  LOCATE 19, 8: PRINT "[mm/µsec] olarak bulabilirsiniz. "
  LOCATE 8, 46: INPUT "", wsp
  LOCATE 17, 7: PRINT STRING$(70, 32)
  LOCATE 18, 7: PRINT STRING$(70, 32)
  LOCATE 19, 7: PRINT STRING$(35, 32): COLOR 7
  T1 = tem + 273.15
  ws = wsp * 1000
  TOP = pAr + pC3H8 + pO2 + pH2
  YAR = pAr / TOP
  YC3H8 = pC3H8 / TOP
  YO2 = pO2 / TOP
  YH2 = pH2 / TOP
  CP1 = YAR * CPAR + YC3H8 * CPC3H8 + YO2 * CPO2 + YH2 * CPH2

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

CV1 = YAR * CVAR + YC3H8 * CVC3H8 + YO2 * CVO2 + YH2 * CVH2
WMM = YAR * WMAR + YC3H8 * WMC3H8 + YO2 * WMO2 + YH2 * WMH2
RMIX = CP1 - CV1
r1 = (RMIX / WMM) * 1000!
akapa1 = CP1 / CV1
P1HG = TOP
P1 = (P1HG / 760)
a1 = SQR(akapa1 * r1 * T1)
Mach = ws / a1
ALFA1 = (akapa1 + 1) / (akapa1 - 1)
BETA1 = (akapa1 - 1) / (2 * akapa1)
P21 = (Mach ^ 2 - BETA1) / (ALFA1 * BETA1)
P12 = 1! / P21
P2 = P1 * P21
T21 = (1 + (P21 / ALFA1)) / (1 + (P12 / ALFA1))
T2 = T1 * T21
P52 = (ALFA1 + 2 - P12) / (1 + (ALFA1 * P12))
P5 = P2 * P52
T52 = (P52 * (ALFA1 + P52)) / (1 + (ALFA1 * P52))
T5 = T2 * T52
P51 = P5 / P1
T51 = T5 / T1
p4a = P4 / 101.3
P41 = p4a / P1
' YAZDIRMA
CALL Cerceve(11, 54, 10, 22)
LOCATE 11,13: PRINT "Vakum değeri [mmHg] : "; USING "#####.##"; P1HG
LOCATE 12,13: PRINT "Yüksek basınç değeri [kPa] : "; USING "#####.##"; P4
LOCATE 13,13: PRINT "Ortam sıcaklığı [K] : "; USING "#####.##"; T1
LOCATE 14,13: PRINT "Şok dalgasının hızı [m/sec] : "; USING "#####.##"; ws
LOCATE 15,13: PRINT "Ortamda ses hızı [m/sec] : "; USING "#####.##"; a1
LOCATE 16,13: PRINT "Mach sayısı (ws/a1) : "; USING "#####.##"; Mach
LOCATE 17,13: PRINT "P2/P1 : "; USING "#####.##"; P21
LOCATE 18,13: PRINT "P5/P1 : "; USING "#####.##"; P51
LOCATE 19,13: PRINT "T5/T1 : "; USING "#####.##"; T51
LOCATE 20,13: PRINT "P5 [atm] : "; USING "#####.##"; P5 : COLOR 4
LOCATE 21,13: PRINT "T5 [K] : "; USING "#####.##"; T5 : COLOR 7, 0
PRINT #2, ""
PRINT #2, " Mach sayısı, basınç ve sıcaklık değerleri : "
PRINT #2, " ----- "
PRINT #2, " Şok dalgasının hızı [m/sec] : "; USING "#####.##"; ws
PRINT #2, " Ortamda ses hızı [m/sec] : "; USING "#####.##"; a1
PRINT #2, " Mach sayısı (ws/a1) : "; USING "#####.##"; Mach
PRINT #2, ""
PRINT #2, " T1 [K] : "; USING "#####.##"; T1
PRINT #2, " P1 [atm] : "; USING "#####.##"; P1
PRINT #2, " P4 [atm] : "; USING "#####.##"; p4a
PRINT #2, " P4 [kPa] : "; USING "#####.##"; P4
PRINT #2, " P4/P1 : "; USING "#####.##"; P41
PRINT #2, ""
PRINT #2, " T2 [K] : "; USING "#####.##"; T2
PRINT #2, " P2 [atm] : "; USING "#####.##"; P2
PRINT #2, ""
PRINT #2, " P2/P1 : "; USING "#####.##"; P21
PRINT #2, " P5/P1 : "; USING "#####.##"; P51

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

PRINT #2, " T5/T1      :"; USING "#####.###"; T51
PRINT #2, ""
PRINT #2, " P5 [atm]   :"; USING "#####.###"; P5
PRINT #2, " T5 [K]     :"; USING "#####.###"; T5
LOCATE 23, 2: COLOR 2, 8: PRINT " Yorum : ";
LOCATE 23, 11: COLOR 7: PRINT STRING$(65, 177);
LOCATE 23, 11: COLOR 8, 7: LINE INPUT "", yorum$ : COLOR 0, 0
PRINT #2, ""
PRINT #2, " ! "; yorum$ : COLOR 0, 0
CLOSE #2
VIEW PRINT 1 TO 25
END SUB

```

```

SUB zBasHarfBul (add$, bh$)
'-----*
' *   BU ALT PROGRAM, DENEYİ YAPAN KİŞİ ADI SORUSUNA VERİLEN   *
' *   CEVAPTAN, KİŞİ ADI VE SOYADININ BAŞ HARFLERİNİ BULUR.   *
'-----*
BİRİNCİ$ = MID$(add$, 1, 1)
LENGHT = LEN(add$)
FOR i = 1 TO LENGHT
IF MID$(add$, i, 1) = " " THEN 10
NEXT i
10 İKİNCİ$ = MID$(add$, i + 1, 1)
bh$ = BİRİNCİ$ + İKİNCİ$
END SUB

```

```

SUB Cerceve (LEFTCOL%, RIGHTCOL%, TOPROW%, BOTTOMROW%) STATIC
'-----*
' *   BU ALT PROGRAM, TEXT EKRANINDA ÇERÇEVE ÇİZİLMESİNİ SAĞLAR. *
'-----*
LOCATE TOPROW%, LEFTCOL%: PRINT CHR$(201)
LOCATE TOPROW%, RIGHTCOL%: PRINT CHR$(187)
LOCATE BOTTOMROW%, LEFTCOL%: PRINT CHR$(200)
LOCATE BOTTOMROW%, RIGHTCOL%: PRINT CHR$(188)
FOR VERTLINE% = TOPROW% + 1 TO BOTTOMROW% - 1
LOCATE VERTLINE%, LEFTCOL%: PRINT CHR$(186)
LOCATE VERTLINE%, RIGHTCOL%: PRINT CHR$(186)
NEXT VERTLINE%
HORIZLENGH = RIGHTCOL% - LEFTCOL% - 1
HORIZLINE$ = STRING$(HORIZLENGH, 205)
LOCATE TOPROW%, LEFTCOL% + 1: PRINT HORIZLINE$
LOCATE BOTTOMROW%, LEFTCOL% + 1: PRINT HORIZLINE$
END SUB

```

```

SUB DOCASTPar (Stur$, DAD$, DD$, KN, DN)
'-----*
' *   BU ALT PROGRAM, OSİLOSKOP VE YÜK YÜKSELTEÇLERİNE AİT   *
' *   PARAMETRELERİN DOSYAYA YAZILMASINI SAĞLAR.             *
'-----*
OPEN DAD$ FOR APPEND AS #2

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

PRINT #2, ""
PRINT #2, " OSİLOSKOP PARAMETRELERİ :"
PRINT #2, " -----"
PRINT #2, " DÜŞEY ÇÖZÜNÜRLÜK (1.C) = "; USING "##.##"; 32 * Preamble1!(8); :
PRINT #2, " [volt/division]"
PRINT #2, " OFFSET (CHAN.1) = "; USING "##.##"; (128 -
Preamble1!(10)) * Preamble1!(8) + Preamble1!(9); : PRINT #2, " [volt]"
PRINT #2, ""
PRINT #2, " DÜŞEY ÇÖZÜNÜRLÜK (2.C) = "; USING "##.##"; 32 * Preamble2!(8); :
PRINT #2, " [volt/division]"
PRINT #2, " OFFSET (CHAN.2) = "; USING "##.##"; (128 -
Preamble2!(10)) * Preamble2!(8) + Preamble2!(9); : PRINT #2, " [volt]"
PRINT #2, ""
PRINT #2, " YATAY ÇÖZÜNÜRLÜK = "; 1000 * (Preamble1!(3) *
Preamble1!(5) / 10); " [milisaniye/division]"
PRINT #2, " DELAY (CHAN.1) = "; USING "#####"; (Preamble1!(3)/2 -
Preamble1!(7)) * Preamble1!(5) + Preamble1!(6); : PRINT #2, " [saniye]"
PRINT #2, " DELAY (CHAN.2) = "; USING "#####"; (Preamble2!(3)/2 -
Preamble2!(7)) * Preamble2!(5) + Preamble2!(6); : PRINT #2, " [saniye]"
PRINT #2, ""
PRINT #2, " CHARGE AMPLIFIER PARAMETRELERİ :"
PRINT #2, " -----"
PRINT #2, " Birinci amplifier (Seri No : 472638) "
PRINT #2, " T1.53E+1 LP 3kHz "
PRINT #2, " S6.00E-1 TC 0.01 s "
PRINT #2, " İkinci amplifier (Seri No : 472640) "
PRINT #2, " T1.57E+1 LP 3kHz "
PRINT #2, " S6.00E-1 TC 0.01s "
PRINT #2, "": COLOR 7, 0
CLOSE #2
END SUB

SUB DosyaAdi (DAD$, AY$, KN, DN)
' *-----*
' * BU ALT PROGRAM, DENEYE AİT BAŞLANGIÇ BİLGİLERİNİ KİŞİ ADINA *
' * BAĞLI OLARAK OLUŞTURDUĞU DİZİN İÇİNDE, KİŞİ ADI, KARIŞIM NO VE *
' * DENEY NO.SUNA BAĞLI OLARAK OLUŞTURACAĞI BİR DOSYAYA YAZAR. *
' *-----*
CALL Cerceve(1, 80, 1, 23)
LOCATE 4, 2: PRINT STRING$(78, 196)
OPEN "MED.INI" FOR INPUT AS #3
LINE INPUT #3, ad$
LINE INPUT #3, tarih$
LINE INPUT #3, saat$
LINE INPUT #3, argon$
LINE INPUT #3, propan$
LINE INPUT #3, oksijen$
LINE INPUT #3, karisim$
LINE INPUT #3, DENEY$
LINE INPUT #3, outfile$
LINE INPUT #3, datfile$
ab$ = ad$
CLOSE #3
OPEN "MED.INI" FOR OUTPUT AS #4

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

LOCATE 1, 55: PRINT " "; DATE$; " "; TIME$; " "
LOCATE 2, 4: PRINT " Deneyi Yapan Kişinin,"
LOCATE 3, 4: PRINT " Adı ve Soyadı <"; : COLOR 2: PRINT ad$;
COLOR 7: PRINT "> : "; : COLOR 11: INPUT "", add$: COLOR 7
IF add$ = "" THEN add$ = ad$
CALL Cerceve(46, 79, 8, 22)
LOCATE 9, 48: PRINT "Bir önceki deneye ait bilgiler"
LOCATE 10,47: PRINT "-----"
LOCATE 11,48: PRINT "ADI SOYADI : "; : COLOR 2: PRINT LEFT$(ad$, 18)
COLOR 7
LOCATE 12, 48: PRINT "TARİH      : "; tarih$
LOCATE 13, 48: PRINT "SAAT      : "; saat$
LOCATE 14, 48: PRINT argon$
LOCATE 15, 48: PRINT propan$
LOCATE 16, 48: PRINT oksijen$
LOCATE 17, 48: PRINT P4$
LOCATE 18, 48: PRINT karisim$
LOCATE 19, 48: PRINT DENEY$
LOCATE 20, 48: PRINT outfile$
LOCATE 21, 48: PRINT datfile$
'----- Şifre -----
IF add$ <> ad$ THEN 77
66 LOCATE 9, 5: PRINT " Şifre ? : "
sifre$ = "" : sifrem$ = "mmm"
LOCATE 9, 16: COLOR 8: PRINT sifrem$
FOR i = 1 TO 3
sif$ = INPUT$(1)
LOCATE 9, 15 + i: COLOR 0, 7: PRINT "X"
sifre$ = sifre$ + sif$
NEXT i
IF sifre$ = sifrem$ THEN 77
COLOR 7, 0: GOTO 66
'-----
77 COLOR 7, 0
LOCATE 12, 5: PRINT " Lütfen, Yeni Değerleri Giriniz : "
LOCATE 13, 5: PRINT " -----"
LOCATE 14, 5: PRINT " Ar miktarı      [mm Hg] = "
LOCATE 15, 5: PRINT " C3H8 miktarı      [mm Hg] = "
LOCATE 16, 5: PRINT " O2 miktarı      [mm Hg] = "
LOCATE 17, 5: PRINT " Karışım No -----> = "
LOCATE 18, 5: PRINT " Deney No -----> = "
LOCATE 19, 5: PRINT " Ortam Sıcaklığı      [°C] = "
' LOCATE 20, 5: PRINT " Yüksek basınç değ. [kPa] = "
COLOR 11
LOCATE 14, 34: INPUT "", pAr
LOCATE 15, 34: INPUT "", pC3H8
LOCATE 16, 34: INPUT "", pO2
LOCATE 17, 34: COLOR 9, 0: INPUT "", KN
LOCATE 18, 34: COLOR 9, 0: INPUT "", DN
LOCATE 19, 34: COLOR 12, 0: INPUT "", tem
' LOCATE 20, 34: INPUT "", p4
COLOR 7, 0
CALL zBasHarfBul(add$, bh$)
ilk2$ = LEFT$(add$, 2)
son2$ = RIGHT$(add$, 2)

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

Path$ = "C:\" + ilk2$ + son2$
PathOut$ = Path$ + "\OUT"
PathDat$ = Path$ + "\DAT"
IF add$ = ab$ THEN 23
OPEN "mdd.bat" FOR OUTPUT AS #1
PRINT #1, "@MD " + Path$
PRINT #1, "@MD " + PathOut$
PRINT #1, "@MD " + PathDat$
CLOSE #1
SHELL "MDD": SHELL "EXIT"
SHELL "DEL MDD.BAT": SHELL "EXIT"
23
DN$ = LTRIM$(STR$(DN))
KN$ = LTRIM$(STR$(KN))
DAD$ = PathOut$ + "\" + bh$ + "-" + KN$ + "-" + DN$ + ".OUT"
AY$ = PathDat$ + "\" + bh$ + "-" + KN$ + "-" + DN$ + ".DAT"
out$ = bh$ + "-" + KN$ + "-" + DN$ + ".OUT"
dat$ = bh$ + "-" + KN$ + "-" + DN$ + ".DAT"
PRINT #4, add$
PRINT #4, DATE$
PRINT #4, TIME$
PRINT #4, "Argon miktarı [mm Hg] :"; pAr
PRINT #4, "Propan miktarı [mm Hg] :"; pC3H8
PRINT #4, "Oksijen miktarı [mm Hg] :"; pO2
PRINT #4, "Driver sec. bas. [kPa] :"; p4
PRINT #4, "Karışım No. :"; KN
PRINT #4, "Deney No. :"; DN
PRINT #4, "OUT dosyası : "; out$
PRINT #4, "DAT dosyası : "; dat$
SLEEP 2: CLS
CALL Cerceve(1, 80, 1, 22)
LOCATE 2, 6: PRINT add$
LOCATE 3, 6: PRINT DATE$; SPC(3); TIME$
LOCATE 4, 6: PRINT DAD$; SPC(3); AY$

LOCATE 5, 2: PRINT STRING$(78, 196)
LOCATE 6, 6: PRINT " Sonuçların yazılacağı dosya adı, deneyi yapan kişinin
ad ve soyadının"
LOCATE 7,6:PRINT " Baş harfleri ile karışım ve deney no.larından
oluşturulur."
LOCATE 9, 6: PRINT " Örnek : "
LOCATE 10,6: PRINT " ME-1-12.OUT : MUSTAFA EYRİBOYUN, 1.
KARIŞIM, 12. DENEY. "
LOCATE 11, 6: PRINT " ME-10-5.DAT : MUSTAFA EYRİBOYUN, 10.
KARIŞIM, 5. DENEY. "
LOCATE 13, 6: PRINT " Aynı deneye ait, OUT ve DAT uzantılı iki dosya
oluşturulur."
LOCATE 14, 6: PRINT " Bunlardan OUT uzantılı dosya, deneye ait bütün
bilgileri içerirken, "
LOCATE 15, 6: PRINT " DAT uzantılı dosya ise sadece osiloskop ekranındaki
dalganın GRAPHER "

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

LOCATE 16, 6: PRINT "   programında çizilebilmesi için gerekli DATA'ları
                        içerir."
LOCATE 17, 6: PRINT "   OUT uzantılı dosyalar "; : COLOR 15: PRINT
                        PathOut$; : COLOR 7: PRINT ", "
LOCATE 18, 6: PRINT "   DAT uzantılı dosyalar "; : COLOR 15: PRINT
                        PathDat$;
COLOR 7: PRINT "   bölmesine kaydedilirler."
LOCATE 19, 6: COLOR 7: PRINT "   Üstteki ana bölme (directory) adı, kişinin
                        adının ilk iki harfi ve "
LOCATE 20, 6: COLOR 7: PRINT "   soyadının son iki harfinden oluşur. Bu
                        bölme içinde de OUT ve DAT "
LOCATE 21, 6: COLOR 7: PRINT "   bölmeleri oluşturulur."
OPEN DAD$ FOR OUTPUT AS #2
OPEN "ARA" FOR OUTPUT AS #5
PRINT #2, " DENEYE AİT BİLGİLER : "
PRINT #2, " -----"
PRINT #2, " Deneyi yapan kişi      : "; add$
PRINT #2, " Deneyin yapıldığı tarih : "; DATE$
PRINT #2, " Deneyin yapıldığı saat  : "; TIME$
PRINT #2, ""
PRINT #2, " ŞOK TÜPÜ PARAMETRELERİ : "
PRINT #2, " -----"
PRINT #2, " İki duyarga arası [mm] = 401"
PRINT #2, " Argon miktarı [mm Hg] ="; pAr
PRINT #2, " Propan miktarı [mm Hg] ="; pC3H8
PRINT #2, " Oksijen miktarı [mm Hg] ="; pO2
PRINT #2, " Driver sec. bas. [kPa] ="; p4
PRINT #2, " Karışım No. -----> ="; KN
PRINT #2, " Deney No. -----> ="; DN
PRINT #2, " Ortam Sıcaklığı [°C] ="; tem
PRINT #2, ""
PRINT #5, DAD$
PRINT #5, pAr
PRINT #5, pC3H8
PRINT #5, pO2
PRINT #5, p4
PRINT #5, tem
CLOSE #5
CALL KismiBasinc(pAr, pC3H8, pO2, pTop)
PRINT #2, " Toplam basınç (vakum) : "; USING "###.###"; pTop; : PRINT #2,
                        " [mm Hg] "
PRINT #2, " Ar   kısmi basıncı : "; USING "###.###"; pAr
PRINT #2, " C3H8 kısmi basıncı : "; USING "###.###"; pC3H8
PRINT #2, " O2   kısmi basıncı : "; USING "###.###"; pO2
PRINT #2, ""
P1 = pTop / 760
PRINT #2, " Vakum bölgesi basıncı,      P1 = "; USING "###.###"; pTop; :
PRINT #2, " [mm Hg] "
PRINT #2, TAB(33); "= "; USING "###.###"; P1; : PRINT #2, " [atm] "
PRINT #2, " Driver section pressure,      P4 = "; USING "###.###"; p4; :
PRINT #2, " [atm] "
PRINT #2, ""
P41 = P4 / P1
PRINT #2, " Başlangıç Basınç Oranı P4/P1 = "; USING "###.###"; P41
PRINT #2, ""

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

PRINT #2, " DOSYALAR : "
PRINT #2, " -----"
PRINT #2, " OUT dosyası : "; DAD$
PRINT #2, " DAT dosyası : "; AY$
CLOSE #2: CLOSE #4: COLOR 7
LOCATE 23, 3: COLOR 7: PRINT "Devam = <Enter>           Çıkış = <Esc>"
36 A$ = INKEY$
IF A$ = CHR$(13) THEN 46
IF A$ = CHR$(27) THEN 102 ELSE 36
46 CLS : COLOR 0, 7
LOCATE 1, 2: PRINT " "; add$; SPC(3); DAD$; STRING$(28, 32)
LOCATE 1, 54: PRINT ; " "; DATE$; SPC(2); TIME$; " ": COLOR 7, 0
GOTO 105
102 END
105 END SUB

SUB Giris
'*-----*
'*  BU ALT PROGRAM, PROGRAM İLK ÇALIŞTIRILDIĞINDA KULLANICIYA  *
'*  PROGRAM HAKKINDA BİLGİ VERİR.                               *
'*-----*
CLS : COLOR 7, 0
CALL Cerceve(3, 74, 2, 21)
LOCATE 3,6: COLOR 7: PRINT " Bu Program, "
LOCATE 4,6: COLOR 7: PRINT " ----- "
LOCATE 6,6: COLOR 2: PRINT " - Osiloskobun ayarlarının yapılması."
LOCATE 7,6: PRINT " - Osiloskop ekranında görünen dalga formuna ait
                        değerlerin"
LOCATE 8, 6: PRINT " bilgisayar ortamına aktarılması."
LOCATE 9, 6: PRINT " - Aktarılan ham değerlerin diske kayıt edilmesi. "
LOCATE 10,6: PRINT " - Ham değerlerin basınç karşılıklarının hesaplanması ve
                        kaydı."
LOCATE 11,6: PRINT " - İstenmesi halinde GRAPHER'e geçiş."
LOCATE 13,6: COLOR 7: PRINT " İşlemlerini gerçekleştir."
LOCATE 14,6: PRINT " Bunun için, öncelikle aşağıdaki işleri
                        yapınız. ": COLOR 7, 0
LOCATE 16,6: COLOR 6, 0: PRINT " * Osiloskop kapalı ise açınız. "
LOCATE 17,6: COLOR 6, 0: PRINT " * Amplifikatör kapalı ise açınız ve
                        Operate tuşuna basınız. "
LOCATE 18,6: COLOR 6, 0: PRINT " * Duyargaların bağlantılarını kontrol
                        ediniz. "
LOCATE 19,6: COLOR 6,0: PRINT " * Probların bağlantılarını kontrol diniz. "
LOCATE 22,3: COLOR 7, 0: PRINT " Devam = <Enter>           Çıkış = <Esc> "
LOCATE 21, 26: COLOR 8: PRINT " Mustafa EYRİBOYUN - 1994 "
COLOR 7, 0
35 A$ = INKEY$
IF A$ = CHR$(13) THEN 45
IF A$ = CHR$(27) THEN 101 ELSE 35
45 CLS '
GOTO 104
101 END
104 END SUB

```

Tablo C.1 (Devam ediyor.)

```

SUB Isaret (SATIR, KOLON)
'-----*
'* BU ALT PROGRAM, PROGRAM AKI I İ İNDE GEREKLİ YERLERE *
'* ONAY İŞARETİ KOYAR. *
'-----*
    LOCATE SATIR, KOLON: COLOR 15: PRINT "√": COLOR 7, 0
END SUB

SUB Locprints (neş)
'-----*
'* BU ALT PROGRAM, ANA PROGRAMIN AKIŞI İÇİNDE HER BİR AŞAMANIN *
'* SONUNDA GELİNEEN NOKTAYA AİT BİLGİLERİN EKRANA YAZILMASINI SAĞLAR. *
'-----*
    IF neş = "OsSetup" THEN 500
    IF neş = "GetOsiChan2" THEN 600
    IF neş = "SaveChan2" THEN 700
    IF neş = "SinyalToBasinc" THEN 800
    IF neş = "Tamam" THEN 900
500 '
    LOCATE 3,6: COLOR 2: PRINT " Osiloskop ayarları yapıldı. "
    LOCATE 4,6: COLOR 2: PRINT " Diğer işlemlere geçmek için, "
    LOCATE 5,6: COLOR 10:PRINT " Ölçüm yapıldıktan sonra "; : COLOR 2:
        PRINT "<D>"; : COLOR 2: PRINT "'ye basınız. " : COLOR 7,0
    GOTO 1000
600 '
    LOCATE 7,6: COLOR 6: PRINT " Osiloskop ekranındaki değerler bilgisayar
        ortamına aktarılıyor. "
    LOCATE 8,6: COLOR 6: PRINT " Lütfen bekleyiniz. " : COLOR 7, 0
    GOTO 1000
700 '
    LOCATE 10,6: COLOR 3: PRINT " Bilgisayar ortamına aktarılan bütün değerler"
    LOCATE 11,7: COLOR 11:PRINT DAŞ; :COLOR 3: PRINT " dosyasına kaydedildi ve"
    LOCATE 12,7: COLOR 11:PRINT DDŞ; :COLOR 3: PRINT " GRAPHER için DATA dosyası"
    LOCATE 13,7: PRINT "oluşturuluyor. Lütfen bekleyiniz."
    GOTO 1000
800 '
    LOCATE 13, 6: COLOR 5: PRINT " Daha önce kaydedilen ham değerlerin basınç
        cinsinden karşılıklarının "
    LOCATE 14, 6: COLOR 5: PRINT " yazılacağı dosyanın adını aşağıya yazınız. "
    GOTO 1000
900 '
    80 LOCATE 24, 6: COLOR 15: PRINT " Bütün işlemler tamamlandı. ": COLOR 7, 0
    1000 END SUB

```

KAYNAKLAR

- Akyüz, M., 1979, Şok Tüpünde İis Formasyonunun İncelenmesi, Doçentlik Tezi, İstanbul, 1979.
- Anderson, J.D.Jr., 1990, Modern Compressible Flow With Historical Perspective, Second Edition, McGraw-Hill, Singapore.
- Arısoy, A., 1979, Karbon Monoksit Gazının Katalitik Demir Yüzeyler Temasında Yanması, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, Ofset Atölyesi, İstanbul.
- Baumgärtner, L., Jander, H. und Wagner, H., Gg., 1983, Rußbildung in verschiedenen Brennstoff-Luft-Flammen, Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 87,1077-1080.
- Bilger, R. W., Stårner, S. H., and, Kee, R. J., 1990, On Reduced Mechanism for Methane-Air Combustion in Nonpremixed Flames, Combustion and Flame, 80: 135-149.
- Borat, O., 1982, Termokimyasal Denge ve Yanma, Ders Notları, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, İstanbul.
- Bowman, C. T., 1986, Chemical Kinetics Models for Complex Reacting Flows, Ber. Bunsenges. Phys. Chem., 90, 940-946.
- Brown, R., and Eraslan, A. N., 1988, Simulation of Ionic Structur in Lean and Close-to-Stoichiometric Acetylene Flames, Combustion and Flame, 73: 1-21.
- Calcote, H.F., 1981, Mechanism of Soot Nucleation in Flames - A Critical Review, Combustion and Flame, 42: 215-242.
- Coffee, T.P., 1984, Kinetic Mechanism for Premixed, Laminar, Steady State Mehane/Air Flames, Combustion and Flame, 55: 161-170.
- Çelik, C., 1992, Yanma Odalarının Modellenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çelik, C., 1993, Üçüncü Yanma Sempozyumu-Bursa, Bildiriler Kitabı, İ.T.Ü. Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Yayın Birimi, İstanbul.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A., 1994, Thermodynamics An Engineering Approach, Second Edition, McGraw-Hill, International Edition.
- D'Alessio, A., Di Lorenzo, A., Sarofim, A.F., Beretta, F., Masi, S., and Venitozzi, C., 1975, Soot Formation in Methane Oxygen Flames, 15th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Enstitute, Pittsburg.
- Ekinci, E., Kütle Transferi, İTÜ Yayınları, 1983.

- Eraslan, A. N., and Brown, R., 1988, Chemiionization and Ion-Molecule Reactions in Fuel-Rich Acetylene Flame, *Combustion and Flame*, 74: 19-37.
- Erdik, E. ve Sarıkaya, Y., Temel Üniversite Kimyası, Hacettepe taş Kitapçılık Ltd. Şti., Ankara, 1985.
- Eyriboyun, M., Heperkan, H.A., 1993, Üçüncü Yanma Sempozyumu-Bursa, Bildiriler Kitabı, İ.T.Ü. Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Yayın Birimi, İstanbul.
- Frenklach, M., Taki, S., Durgaprasad, M.B., and Matula, R.A., 1983, Soot Formation in Shock-Tube Pyrolysis of Acetylene, Allene, and 1,3-Butadiene, *Combust. and Flame*, 54: 81-101.
- Frenklach, M., and Bornside D.E., 1983, Shock-Initiated Ignition in Methane-Propane Mixtures, *Combustion and Flame*, 56: 1-27.
- Farmer, R., Edelman, R., and Wong, E., 1981, Modeling Soot Emission in Combustion Systems, Particulate Carbon: Formation During Combustion, Plenum Press, New York.
- Garo, A., Prado, G., and Lahaye, J., 1990, Chemical Aspect of Soot Particles Oxidation in Laminar Methane-Air Diffusion Flame, *Combustion and Flame*, 79: 226-233.
- Glass, I. I., Hall, J. G., 1959, Handbook of Supersonic Aerodynamics, Section 18, Shock Tubes, Navard Report 1488 (Vol. 6): 499-524
- Göğüş, A. Y., 1990, Computer Aided Combustion Modeling for Comprehensive Kinetics and Transport in The Gas Phase, Msc. Thesis, METU, Ankara.
- Gülde, Ö. L., 1989, Influence of Hydrocarbon Fuel Structural Constitution and Flame Temperature on Soot Formation in Laminar Diffusion Flame, *Combustion and Flame*, 78: 179-194.
- Gülde, Ö. L., 1992, Soot Formation in Laminar Diffusion Flames at Elevated Temperatures, *Combustion and Flame*, 88: 74-82.
- Gülde, Ö. L., 1993, Influence of Sulfur Dioxide on Soot Formation in Diffusion Flames, *Combustion and Flame*, 92: 410-418.
- Gülde, Ö. L., Snelling, D. R., 1993, Influence of Nitrogen Dilution and Flame Temperature on Soot Formation in Diffusion Flames, *Combustion and Flame*, 92: 115-124.
- Harris, S. J., 1986, Soot Particle Inception and O₂ Profiles in a Premixed Ethylene Flame, *Combustion and Flame*, 66: 211-214.
- Harris, M. M., King, G. B., and Laurendeau, N. M., 1986, Influence of temperature and Hydroxyl Concentration on Incipient Soot Formation in Premixed Flames, *Combustion and Flame*, 64: 99-112.

- Haynes, B. S., and Wagner, H. G.G., 1981, Soot Formation, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 7, pp.229-273
- Homan, H., and Robins, W. K., 1986, A Carbon-14 Tracer Study of the Relative Fractions of Various Fuel Carbon in Soot, Combustion and Flame, 63: 177-190.
- Incropera, F.P., De Witt, D.P., 1990, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Third Edition, John Wiley & Sons.
- Jachimowski, C. J., 1984, Chemical Kinetics Reaction Mechanism for the Combustion of Propane, Combustion and Flame, 55: 213-224.
- Jones, W.P., and Lindstedt, R.P., 1988, Global Reaction Schemes for Hydrocarbon Combustion, Combustion and Flame, 73: 233-249.
- Kadı, İ., 1992, Detonasyon Olaylarının Bilgisayar Destekli Ölçme ve Analizi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kee, R. J., Miller, J. A., Jefferson, T. H., 1980, CHEMKIN: A General-Purpose, Problem-Independent, Transportable, Fortran Chemical Kinetics Code Package, Sandia Laboratories, Report Number: SAND80-8003
- Köylü, Ü. Ö. and Faeth, G. M., 1991, Carbon Monoxide and Soot Emissions from Liquid-Fueled Buoyant Turbulent Diffusion Flames, Combustion And Flame, 87: 61-76.
- Köylü, Ü. Ö., 1992, Emission, Structure and Optical Properties of Overfire Soot from Buoyant Turbulent Diffusion Flames, Ph. D. Thesis, The University of Michigan, USA.
- Kuo, K. K., 1986, Principles Of Combustion, John Wiley & Sons, Printed in Singapore.
- Lazzara, C.P., Biordi, J.C., Papp, J.F., 1973, Concentration Profiles for Radical Species in a Methane-Oxygen-Argon Flame, Combustion and Flame ,21, 371-382.
- Leuckel, W., 1984, Enerji Tekniği Ders Notları, Karlsruhe Üniversitesi, Engler-Burte Enstitüsü.
- Megaridis, C.M., and Dobbins, R.A., 1989, Comparison of Soot Growth and Oxidation in Smoking and Non-Smoking Ethylene Diffusion Flames, Combust. Sci. and Tech., Vol. 47, pp. 117-138.
- Miller, J. A. and Bowman, C. T., 1989, Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 15, pp.287-338
- Olson, D. B. and Madronich, S., 1985, The Effect of Temperature on Soot Formation in Premixed Flames, Combustion And Flame, 60: 203-213.

- Pratt, D. T., 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.
- Perry, R.H., and Chilton, 1973, Chemical Engineers' Handbook, Fifth Edition, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd..
- Rothschild, W.G., Kaiser, E.W., and Lavoie, G.A., 1986, Effects of Fuel-Air Equivalence ratio, Temperature, and Inhibitor on the Structure of Laminar Methane-Air Flames, Combust. Sci. and Tech., Vol. 47, pp. 209-227.
- Saito, K., Williams, F. A., Gordon, A. S., 1986, Effects of Oxygen on Soot Formation in Methane Diffusion Flames, Combust. Sci. and Tech., Vol. 47, pp. 117-138.
- Seshadri, K., and Peters, N., 1988, Asymptotic Structure and Extinction of Methane-Air Diffusion Flames, Combustion And Flame, 73: 23-44.
- Seshadri, K., and Peters, N., 1990, An Inner Structure of Methane-Air Flames, Combustion And Flame, 81: 96-118.
- Sienko, M. J., Plane, R. A., 1983, Temel Kimya, Dördüncü Baskı, Çevirenler :Necla Güngöz ve Diğerleri, Savaş Yayınları, Fen Bilimleri Dizisi, Ankara.
- Sivathanu, Y. R. and Faeth, G. M., 1990, Generalized State Relationships for Scalar Properties in Nonpremixed Hydrocarbon/Air Flames, Combustion And Flame, 82: 211-230.
- Strehlow, R. A., Fundamentals of Combustion, McGraw-Hill Book Company, 1985.
- Şanata, H.N., 1989 (Ağustos), Doğal gazın Enerji Dengeleri ve Ülke Ekonomisine Etkileri, Mühendis ve Makina, Doğal Gaz Özel Sayısı, MMO Yayını.
- Tsederberg, N. V., Thermal Conductivity of Gases and Liquids, (Translations by Scripta Technica) Edited by Robert D. Cess, Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1965, USA.
- Warnatz, J., 1983, Hydrocarbon Oxidation at High Temperature, Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 87, 1008-1983
- Westbrook, C. K., Pitz, W. J., and Urtiew, P. A., 1983, International Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems (9th, Poitiers, France).
- Westbrook, C. K. and Dryer, F., 1984, Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion, Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 10, pp.1-57.

Özgeçmiş (Mustafa EYRİBOYUN)

- 10 Aralık 1959 Çaycuma-Zonguldak doğumlu.
 - 1982’de Zonguldak Devlet Mimarlık-Mühendislik Akademisi’nden Makina Mühendisi olarak mezun oldu.
 - 1985’de Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Isı-Proses Dalında yüksek lisansını tamamladı.
 - 1985-1986 yıllarında Isparta, Antalya, Denizli ve Burdur illerindeki askeri inşaat ve tesislerin, ısıtma, soğutma, klima ve güneş enerjili sıcak su sistemlerinin inşaatını içeren işlerde, kontrol mühendisi asteğmen olarak askerliğini yaptı.
 - Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevliliğine, askerlik hizmetinden önce (1983) başladı ve 1995’e kadar sürdürdü.
 - 1995’de aynı bölümde öğretim görevlisi oldu ve Isı Transferi, Isıtma-Havalandırma ve Klima derslerini okutmaya başladı.
 - 1994-1995 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Trisonik Laboratuvarı’nda, propan yanmasında etkili olan reaksiyon mekanizmasının tesbiti amacıyla, bilgisayar destekli bir şok tüpü deney seti kurup çalıştırdı.
 - 1996 yılı Ağustos-Aralık ayları arasında Japon Hükümeti’nin davetlisi olarak, Japonya’nın Osaka kentinde iki haftalık yoğun Japonca dil kursu ve DAIKIN firmasının İngilizce olarak yürütülen, üç aylık “Air-Conditioning Engineering” kursuna katıldı.
 - Binalarda ısı kaybı hesabının kolay ve hızlı bir şekilde yapılması amacıyla, bütün standart değerleri ve tabloları bünyesinde bulunduran bir bilgisayar programı yapmıştır.
 - Okumak, bilgisayar, elektronik, fotoğraf, sinema, şiir ve kır gezileri özel ilgi alanlarıdır. Amatörce denemeler ve şiir yazmakta, ayrıca mühendislik öğrenimiyle ilgili animasyonlu bilgisayar programları yapmaktadır. Türkiye ve Japonya’da olmak üzere ondan fazla slayt gösterisi yapmış ayrıca karma fotoğraf sergilerinde fotoğrafları sergilenmiştir.
 - Makina Mühendisleri Odası, Türk Isı Bilimi ve Tekniği Derneği, JICA (Japan International Cooperation Agency) Katılımcıları Derneği ve Çağdaş Yaşamı Destekleme Derneği üyesidir. Zonguldak Kültür ve Eğitim Vakfı (ZOKEV) ile Zonguldak Fotoğraf Grubu (ZFG) kurucularındandır.
 - Halen Zonguldak Karaelmas Üniversitesi’ndeki öğretim görevliliğini sürdürmektedir.
 - Evlidir. Çocuğu yoktur.
-