

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İKİ BOYUTLU BİR BRÜLÖRDEKİ YANMANIN  
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE  
İNCELENMESİ**

Makine Müh. Erman ÖZEN

**FBE Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı Isı Proses Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS BİTİRME TEZİ**

**Tez Danışmanı:** Prof. Dr. Oktay ÖZCAN

**Jüri Üyeleri** : Prof. Dr. İsmail TEKE

Doç. Dr. Nurten VARDAR

**İSTANBUL, 2009**

**İÇİNDEKİLER**

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
<b>1 GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Nedir.....	2
1.2 HAD Analizlerinin Planlanması ve Çözüm Adımları .....	4
1.2.1 HAD Analizlerinin Planlanması.....	4
1.2.2 Problem Çözme Adımları .....	5
<b>2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>7</b>
2.1 Sayısal Bölümde Ele Alınan Deney .....	7
2.2 Brülör Problemlerinin HAD ile Çözümü.....	9
2.2.1 HAD' ın Önemli İçerikleri.....	10
2.2.2 HAD Modellemenin Ana Hedefi.....	11
2.2.3 Hesap Alanı Seçimi .....	12
2.2.4 Sınır Şartlarının Seçimi.....	13
2.2.5 Numerik Analiz ve Hesap Ağları .....	14
2.3 HAD Merkezli Yakma Modellerine Blok Oluşturulması .....	17
2.3.1 Türbülanslı Akışkanlar Mekaniği.....	18
2.3.1.1 Kapanış Problemi .....	18
2.3.1.2 Favre ve Reynolds Ortalaması .....	20
2.3.1.3 Türbülans Modelleri .....	21
2.3.1.3.1 Standart k- $\epsilon$ Modeli.....	21
2.3.1.3.2 k- $\epsilon$ Türbülans Modeli Sınır Şartları .....	23
2.3.2 Homojen Kimya .....	24
2.3.3 Duvar Isı Transferi.....	31
<b>3 SAYISAL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>34</b>
3.1 Reaksiyonel Durum (Problem 1).....	34
3.1.1 Problemin Açıklanması.....	34
3.1.2 Sayısal Çözüm Alanının Tanımlanması.....	35
3.1.3 Çözüm Algoritması.....	36
3.1.4 Çözüm Sonuçları .....	45
3.2 İzotermal Durum ( Problem 2 ).....	54

3.2.1	Problemin Açıklanması.....	54
3.2.2	Çözüm Algoritması.....	54
3.2.3	Çözüm Sonuçları .....	56
4	SONUÇLAR .....	63
	KAYNAKLAR.....	64
	ÖZGEÇMİŞ.....	68

**SİMGE LİSTESİ**

$A$	Arrhenius faktörü
$A_f$	Yakıt girişi kesit alanı
$a_p$	Merkezdeki hücreye ait katsayı
$a_{nb}$	Komşu hücreye ait katsayı
$b$	Sınır şartlarının sabit değeri
$C_g$	Sabit
$C_\varepsilon$	Sabit
$C$	Alevin yapısına bağlı sabit
$c$	Sabit
$c_i$	Türlerin molar konsantrasyonu
$\vec{e}$	Birim vektör
$E_A$	Aktivasyon enerjisi
$\tilde{f}$	Karışım kesri
$\tilde{g}$	Karışım kesri varyansı
$g$	Yerçekimi ivmesi
$H$	Entalpi
$K$	Karman sabiti ( $K \approx 0.4$ )
$k$	Reaksiyon katsayısı
$\tilde{k}$	Anlık türbülans kinetik enerjisi
$k_s$	yüzey pürüzlülük değeri
$L^*$	Karakteristik uzunluk
$M$	Ortalama molar karışım kütlesi
$m$	Sıcaklık üssü
$m_a$	Hava debisi
$m_f$	Yakıt debisi
$N$	İterasyon sonundaki artık değer
$P$	Statik basınç
$R$	Gaz sabiti (8.3143 kJ/mole-K)

$r_i$	Reaksiyon oranı
$R_\phi$	$\phi$ değişkenine ait maksimum artık değer
$r_{O_2}$	Stokiyometrik oksijen gereksinimi
$S_\phi$	$\phi$ için kaynak terim
T	Sıcaklık
$\bar{U}$	Ortalama hız
$u^*$	Düzgün yapıdaki karakteristik hız
$u_a$	Hava hızı
$u_f$	Yakıt hızı
$u_{rms}$	Türbülans hızı
$u_\tau$	Sürtünme hızı
$\tilde{u}$	x yönündeki anlık hız
$\tilde{v}$	y yönündeki anlık hız
$\tilde{w}$	z yönündeki anlık hız
y	Duvardan normale göre uzaklık
$Y_i$	Türler için kaynak terim
$\dot{Y}_i$	Reaksiyon oranı
$\bar{Y}_i$	Zaman ortalamalı hacimsel konsantrasyon
$\bar{Y}_F$	Zaman ortalamalı yakıt konsantrasyonu
$Y_{min}$	$Y_F$ ve $Y_{O_2}$ nin en küçük konsantrasyonu
$Y_{O_2}$	Lokal ortalama oksijen konsantrasyonu
$Y_{Pr}$	Lokal ortalama ürün konsantrasyonu
$\rho$	Akışkanın yoğunluğu
$\bar{\rho}$	Ortalama yoğunluk
$\partial$	Kısmi türev
$\sigma_e$	Sönümlenme oranı sabiti
$\sigma_f$	Karışım kesri sabiti
$\sigma_g$	Karışım kesri varyansı sabiti
$\sigma_k$	Türbülans enerjisi sabiti

$\tilde{\epsilon}$	Anlık türbülans kinetik enerjisi sönmleme oranı
$\nabla$	Gradyan
$\sum$	Toplam
$\tau_{ij}$	Viskoz gerilme tansörü
$\tau_w$	Duvar kayma gerilmesi
$\delta_{ij}$	Kronecker delta
$\mu$	Akışkanın moleküler viskozitesi
$\mu_e$	Akışkanın efektif moleküler viskozitesi
$\mu_t$	Akışkanın türbülans viskozitesi
$\lambda$	Akışkanın hacimsel viskozite katsayısı
$\phi$	Transfer edilen değişkenler (kimyasal türler, entalpi vb.)
$\Gamma_\phi$	$\phi$ için moleküler difüzyon katsayısı
$\nu$	Kinematik viskozite
$\gamma$	Kütle kesri
$\chi$	Düzeltilme katsayısı

***KISALTIMA LİSTESİ***

CFD	Computational Fluid Dynamics
EBU	Eddy Breakup
EDC	Eddy Dissipation Concept
EDX	Eddy Dissipation Combustion Model
FAR	Fuel to Air Mass Ratio
FAVR	Fuel to Blocked Air Velocity Ratio
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HY	Hava Yakıt Oranı
IR	Injected Air Jet to Blocked Air Velocity Ratio
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Test düzeneğinin şematik gösterimi .....	7
Şekil 2.2	Deney için ortalama sıcaklık eğrileri (a)FAVR=0.631 ve (b)FAVR=0.189 .....	8
Şekil 2.3a	Tipik endüstriyel ocak geometrisinin dış görüntüsü .....	12
Şekil 2.3b	Simetri özelliği uygulanmış tipik endüstriyel brülör.....	13
Şekil 2.4	Gelişmiş bir HAD kodunun tipik alt model bileşenleri.....	18
Şekil 2.5	Belirli bir yönde radyant enerji dengesi .....	32
Şekil 2.6	Bir hacime ulaşan yönsel şiddetler (a) $S_2$ (b) $S_4$ .....	33
Şekil 3.1	Probleme için tasarlanan çözüm ağında kullanılan sınır şartları ve koordinatlar ..	36
Şekil 3.2	Probleme ait duvar yaklaşım modelli çözüm ağı .....	36
Şekil 3.3	Grid-Scale komutu .....	37
Şekil 3.4	Çözücü ayarlarının yapılması .....	37
Şekil 3.5	Viskozite model ayarlamaları .....	38
Şekil 3.6	Enerji denklemlerinin aktifleştirilmesi .....	38
Şekil 3.7	Reaksiyon model ayarlamaları.....	39
Şekil 3.8	Karışımın termofiziksel özellikleri.....	40
Şekil 3.9	Çevre şartları.....	40
Şekil 3.10	Hava için hız giriş şartı.....	41
Şekil 3.11	Yakıt için hız giriş şartı .....	42
Şekil 3.12	Çıkış için outflow sınır şartı.....	42
Şekil 3.13	Duvarlar için duvar sınır şartı .....	43
Şekil 3.14	Başlangıç değerlerinin atanması .....	43
Şekil 3.15	Çözüm kontrol parametreleri .....	44
Şekil 3.16	Problem1 Alev A için yakınsama eğrileri .....	45
Şekil 3.17	Alev A (FAVR=0.46) için sıcaklık profili.....	46
Şekil 3.18	Alev A (FAVR=0.46) için hız profili.....	46
Şekil 3.19	Alev B (FAVR=0.27) için sıcaklık profili.....	47
Şekil 3.20	Alev B (FAVR=0.27) için hız profili .....	47
Şekil 3.21	Alev C (FAVR=0.14) için sıcaklık profili.....	48
Şekil 3.22	Alev C (FAVR=0.14) için hız profili .....	48
Şekil 3.23	Alev A (FAVR=0.631) için sıcaklık profili.....	49
Şekil 3.24	Alev A (FAVR=0.631) için hız profili.....	49
Şekil 3.25	Alev B (FAVR=0.375) için sıcaklık profili.....	50

Şekil 3.26 Alev B (FAVR=0.375) için hız profili .....	50
Şekil 3.27 Alev C (FAVR=0.189) için sıcaklık profili.....	51
Şekil 3.28 Alev C (FAVR=0.189) için hız profili .....	51
Şekil 3.29 X/D=1.5 için sıcaklık profilleri.....	52
Şekil 3.30 X/D=3 için sıcaklık profilleri.....	52
Şekil 3.31 X/D=4.5 için sıcaklık profilleri.....	53
Şekil 3.32 X/D=6 için sıcaklık profilleri.....	53
Şekil 3.33 Problem 2 Akım A (IR= 0.53) için yakınsama eğrileri.....	56
Şekil 3.34 Akım A (Izotermal) IR=0.73 için hız profili .....	57
Şekil 3.35 Akım A (Izotermal) IR=0.53 için hız profili .....	57
Şekil 3.36 Akım A X/D=0.75 ve X/D=0.25 için hız profilleri.....	58
Şekil 3.37 Akım A X/D=1 ve X/D=0.28 için hız profilleri .....	58
Şekil 3.38 Akım A X/D=3 ve X/D=0.9 için hız profilleri .....	59
Şekil 3.39 Akım A X/D=4 ve X/D=1.1 için hız profilleri .....	59
Şekil 3.40 Akım A X/D=0.75 ve X/D= 0.25 için türbülans kinetik enerji profilleri.....	60
Şekil 3.41 Akım A X/D=1 ve X/D=0.28 için türbülans kinetik enerji profilleri.....	60
Şekil 3.42 Akım A X/D=3 ve X/D=0.39 için türbülans kinetik enerji profilleri .....	61
Şekil 3.43 Akım A X/D=4 ve X/D=1.1 için türbülans kinetik enerji profilleri .....	61

**ÇİZELGE LİSTESİ**

Çizelge 1.1 FLUENT programında izlenecek çözüm adımları için genel bir şema.....	6
Çizelge 2.1 HAD' da çözülen kartezyen diferansiyel denklemler .....	10
Çizelge 3.1 Sayısal çözümde kullanılan probleme ait parametreler.....	35

## ÖNSÖZ

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak, akışkanlar dinamiği problemlerinin sayısal olarak çözümlenmesi konusu da gelişmiş ve yaygınlaşmıştır. Sayısal yöntemlerin kullanılması ile akışkanlar dinamiği denklemleri, bilgisayar aracılığı ile hızlı bir şekilde sayısal olarak yapılabilmektedir. Teknoloji üretiminde rekabetin, tamamen hızlı bilgi üretmeye dayalı olduğu günümüzde, endüstriyel kuruluşlar bünyelerinde, gelişmiş bilgisayar sistemleri oluşturmakta ve çeşitli firmalar tarafından geliştirilmiş olan FLUENT ve benzeri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programlarını kullanarak teknoloji üretimindeki hızlı rekabet ortamına ayak uydurmaktadırlar.

Bu tez çalışmasında da mühendislikte geniş bir uygulama alanına sahip akışkanlar dinamiğinin en önemli konularından yanma problemi FLUENT programı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir.

Tez çalışmasını yöneten, tüm tecrübesi ve deneyimlerini paylaşan, olumlu eleştirileri ve önerileri ile çalışmalarına büyük katkısı bulunan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Oktay ÖZCAN'a, gösterdikleri destek ve anlayıştan ötürü ailem, çalışma arkadaşlarım ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

## ÖZET

Bu tez çalışmasında iki boyutlu bir brülörde yanma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için yanmanın olduğu (reaksiyonel) ve yanmanın olmadığı (izotermal) durum problemleri sayısal olarak incelenmiştir.

Sayısal çalışmalar kısmında iki ayrı problem, çözüm ağıları GAMBİT 2.2.30 programında tasarlandıktan sonra sonlu hacimler metodunu kullanan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) paket programlarından FLUENT 6.2.16 kullanılarak çözülmüştür. HAD analizlerinin temelleri üzerinde durulmuş ve kullanılan sayısal çözüm yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre hız ve sıcaklık incelemeleri yapılmıştır. Değişik alev parametreleri için hız büyüklüklerinin, türbülans kinetik enerjisinin boyutsuz parametreler ile değişimleri incelenmiştir.

Farklı değerler kullanılarak elde edilen sonuçlar Excel programına aktararak, literatürde benzer konularda daha önce yapılmış sayısal ve deneysel çalışmalarla, grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Brülör, Yanma, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

**ABSTRACT**

In this thesis, reacting flow in a two dimensional burner problem and to understand this flow easier isothermal flow problems were examined numerically.

Two different problems were solved by using Computational Fluid Dynamics (CFD) packet program FLUENT 6.2.16, which is using finite volume method, after their solution areas and meshes designed in GAMBIT 2.2.30 program. Basics of CFD analysis were emphasized and numerical solution methods used by software were explained. For different flames parameters velocity magnitude and turbulent kinetic energy results were discussed.

Finally, numerical results obtained by different values were processed by EXCEL and compared by graphics with previous studies and experimental datas in literature.

**Keywords:** Burner, Reacting flow, Computational fluid dynamics (CFD)

## 1.GİRİŞ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uzun zamandır uzay, otomotiv, elektronik gibi endüstrilerde sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kimyasal proseslerde ve hidrokarbon proses endüstrisinde güvenilir bir problem çözücü araç olarak yer edinmiştir. Mühendisler, brülör teknoloji dizaynlarında rutin olarak HAD'ı kullanmaya yakın bir zamanda başlamışlardır. HAD mühendise önceleri öngörülmesi imkansız ve pahalı test prosedürleri gereksinen işletme parametrelerini inceleme fırsatı sunmuştur.

Bu tez çalışmasında yanma ile ilgili iki ayrı durum incelenmiştir. İki boyutlu bir brülörde yanma probleminin daha iyi incelenbilmesi ve akım karakteristiklerinin anlaşılabilmesi için yanmanın olmadığı (izotermal) ve yanmanın olduğu (reaksiyonel) durum birlikte incelenmiştir. Bu tez çalışmasında, HAD paket programlarından FLUENT kullanılarak problemler sayısal yöntemlerle çözülmüştür. HAD kavramı ve HAD analizlerinin planlanması, çözüm adımları anlatılmıştır.

İlgili konularda daha önce yapılmış deneysel ve nümerik çalışmalara literatür araştırması bölümünde yer verilmiştir.

Öncelikle FLUENT'in sunduğu model ve ağ oluşturma programı (pre-processor) olan GAMBIT' de problem için çözüm ağları hassas sonuçlar elde edilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmaya çalışılmıştır. Tasarlanan çözüm ağları FLUENT programına aktarılıp sınır koşulları verildikten sonra sonlu hacimler yöntemi kullanılarak sayısal analiz gerçekleştirilmiştir.

Buradan elde edilen sonuçlar EXCEL programı yardımıyla grafiklere dönüştürülerek literatürde daha önce yapılmış deneysel bir çalışmayla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre değişik koşullar için sıcaklık, hız ve türbülans kinetik enerji incelemeleri yapılmıştır.

### 1.1 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği nedir?

Akışkanlar dinamiği bilimi, sıvılar için hidrodinamik, gazlar için aerodinamik adlarını alır. Teorik, deneysel ve sayısal çalışmalar ile hareketli akışkanın davranışını, çevresi ile olan etkileşimini inceler. Teorik çalışmalar çok kısıtlı durumlar için yapılabildiğinden günümüzde büyük ölçüde terkedilmiş ve sayısal çalışmalara ağırlık verilmişti. Deneysel çalışmalar ise hesap sonuçlarının test edilmesinde çok önemli rol oynamaktadır.

1950'li yıllardan beri büyük bir hızla gelişen bilgisayarların hız ve bellek kapasitelerindeki artışa bağlı olarak akışkanlar dinamiği problemlerinin sayısal olarak çözümlenmesi konusu da gelişmiş ve yaygınlaşmıştır. Analitik olarak çözülemeyen akışkanlar dinamiği denklemleri, sayısal çözüm teknikleri kullanılarak çözülmekte ve çeşitli durumlar için detaylı incelemeler yapılmaktadır. Akışkanlar dinamiği problemlerinin bilgisayar yardımıyla sayısal yöntemlerle çözülmesi konusu hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) adıyla yeni bir çalışma alanı doğmasına neden olmuştur. Literatürde İngilizce anlamının baş harfleri kullanılarak CFD (Computational Fluid Dynamics) olarak da karşımıza çıkan hesaplamalı akışkanlar dinamiği, başka bir deyişle akışkan bir nesnenin dinamiği üstüne çalışmamıza olanak sağlayan hesaplama teknolojisidir.

Tasarım ve geliştirme zamanının kısalması, deneysel model testlerinde oluşturulamayan akış koşullarının benzeşiminin kolayca yapılabilmesi, daha detaylı ve anlaşılır bilgi vermesi, daha az enerji tüketiminin ortaya çıkması günümüzde akışkanlar dinamiği çalışmalarında HAD kullanımını oldukça yaygınlaştırmış, deneysel ve teorik çalışmaların önüne geçirmiştir.

Akışkan ile etkileşim içeren her mühendislik problemi büyük ölçüde HAD kapsamına girmektedir. HAD çalışmalarında, bilgisayar yardımıyla akış simülasyonu yapılacak olan alan ve bu alanda meydana gelen etkileşimler detaylı olarak görülebilmektedir. HAD kullanarak sadece akışkanın davranışı üstüne öngörülenin yanında ısı transferi, kütle transferi, faz değişimi (donma, buharlaşma), kimyasal reaksiyonlar (yanma), mekanik hareketler (zorlanmış dönmeler), katı yapılarıyla ilgili deformasyon (rüzgarda bayrak ve direğin davranışları) incelenebilir.

Herhangi bir HAD analizi genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar işlem sırasına göre aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- a) Katı model ve sayısal ağ tabakasının oluşturulması
- b) Sınır şartlarının tanımı ve çözüm koşullarının ayarlanması
- c) Sonuçların yorumlanması

Sisteme dışarıdan dahil edilen bir CAD paketinde bulunan veya yeni tasarlanan bir geometri programı HAD prosesinin başlangıcıdır. Bir HAD analizinin yapılabilmesi için akış hacminin sonlu sayıda ufak parçalara (hücrelere) bölünmesi gerekmektedir. İki boyutlu sayısal çözüm alanında bu hücreler alan; üç boyutlu çözüm alanında ise hacim olmaktadır. 2 veya 3 boyutlu CAD çalışacak çerçeveyi oluşturur ve bu çerçeve içine bir ağ tasarlar. Bu ağ veya ızgara küçük parçacıklardan meydana gelen bir yapıdır ve bu yapı akışkanın içinden geçeceği bölgeyi doldurur. Bu işleme sayısal ağ oluşturmak işlemi, sonucunda oluşan modele de çözüm ağı veya sayısal model denir. Bu parçaların (elemanlar) sayısı ne kadar büyük ise sonuçlar o kadar doğru olur. Ancak bu parçaların sayısı analiz süresini de doğrudan etkiler. Bu nedenle yüksek gradyenlerin olduğu bölgelerde yoğun diğer bölgelerde daha seyrek elemanlar kullanılarak optimum bir sayı bulunması gerekir. Sayısal ağ tabakası oluşturulduktan sonra sıra sınır şartlarının tanımlanmasına ve çözüm ayarlarının yapılmasına gelir. Burada dikkat edilmesi gereken birçok husus vardır. Bunlardan başlıcaları sayısal model sınırlarında kullanılacak sınır şartları ve arka planda yapılacak hesaplamalar için kullanılacak sayısal yöntemlerdir. Daha sonra bir HAD kodu akışkanının belirleyici denklemlerini (Navier-Stokes, Euler gibi akışkanların tanımını yapan temel denklemler) ağın içindeki tüm hücrelere uyarlar. Bilgisayar prosesi tüm hücreler arasında çaprazlama haberleşip bilgi iletir ve problemi çözene değin bunu tekrarlamalı olarak yapar.

Bu işlemlerden sonra tüm akışkan etki alanının ve her bir hücre yapısının içinde korunum denklemleri dengelenir. Hesaplama tamamlandığında, HAD çözümü incelenen parçanın yüzeyinde ve çözüm ağındaki tüm basınç ve hızları içerir ve bu genelde milyonlarca sayıdan oluşur.

## 1.2 HAD Analizlerinin Planlanması ve Çözüm Adımları

### 1.2.1 HAD Analizlerinin Planlanması

Bu tez çalışmasında hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümlenmesinde çözücü program olarak FLUENT kullanılmıştır. Bir problemi FLUENT'te çözmeye başlamadan önce aşağıdaki adımlarla kararlar alınmalıdır.

**1) Modelleme Hedeflerinin Açıklanması:** HAD modelinden ne tip çözümler istenmekte ve bu çözümler nasıl kullanılacak? Modelden ne kadar doğruluk derecesi bekleniyor?

**2) Çözüm Modelinin Seçilmesi:** Modelleneyecek olan sistemin bir parçasını nasıl ayırırsınız? Çözüm alanı nereden başlayıp nerede bitecek? Modelin sınırlarında ne gibi sınır şartları kullanılacak? Problem 2 boyutta çözülebilir mi, yoksa bu 3 boyutlu bir model mi? Ne tür bir ağ yapısı bu problem için en idealdir?

**3) Fiziksel Modelin Seçilmesi:** Akış viskoz mu, laminer mi, türbülanslı mı? Akış daimi mi, zamana bağlı mı? Isı transferi önemsenmeli mi? Akışkan sıkıştırılabilir mi, sıkıştırılamaz mı? Başka fiziksel modeller de kullanılabilir mi?

**4) Çözüm Prosedürünün Kararlaştırılması:** Problem, sadece genel çözüm formülü ve çözüm parametreleri ile çözülebilir mi? Daha akılcı bir çözüm prosedürü ile daha yakınsak sonuçlar elde edilebilir mi? Bilgisayarınız bu yollarla ne kadar sürede bir yakınsamaya varabiliyor?

Bu konular üzerinde verilecek doğru cevaplar ve bunlar doğrultusunda izlenecek yolla oluşturulacak modelin başarısı artacaktır.

### 1.2.2 Problem Çözüm Adımları

Çözülecek problemin önemli özellikleri belirlenip analizi yapıldıktan sonra aşağıdaki temel prosedürü izleyerek çözümü yapabilirsiniz:

- Model geometrisi ve ağ yapısını oluşturun.
- Çözücü (FLUENT programı) 2B (İki boyutlu) veya 3B ( 3 Boyutlu) akıma göre başlatın.
- Ağ yapısını çözücüye girin.
- Ağ yapısını kontrol edin.
- Çözücü formülasyonunu seçin.
- Çözülecek basit eşitlikleri seçin: Laminer ya da türbülanslı, varsa kimyasal reaksiyonlar, ısı transferi modelleri vb. ek modellerinde belirtilmesi gereklidir.
- Materyal özelliklerini belirtin.
- Sınır şartlarını belirtin.
- Çözüm kontrol parametrelerini ayarlayın.
- Akış alanını ayarlayın ve çözücüye başlatın.
- Çözümü hesaplatın.
- Sonuçları gözden geçirin.
- Sonuçları kaydedin.
- Eğer gerekirse, ağ yapısını iyileştirmeye çalışın ya da numerik veya fiziksel model üzerinde revizyonlar yapın.

Birinci adım için FLUENT programının dışında bir geometri modelleyicisi ve ağ oluşturucusu gerekmektedir. GAMBIT bunun için uygun bir programdır. Ayrıca TGrid ile yüzey ağ yapılarından hacimsel ağ yapısı oluşturabilirsiniz. İkinci adım için oluşturulan çözüm ağına göre başlangıç kısmında FLUENT te 2D ya da 3D olarak oturum açılır.

İzlenecek çözüm adımlar için Çizelge 1.1 deki gibi genel bir şema oluşturulabilir.

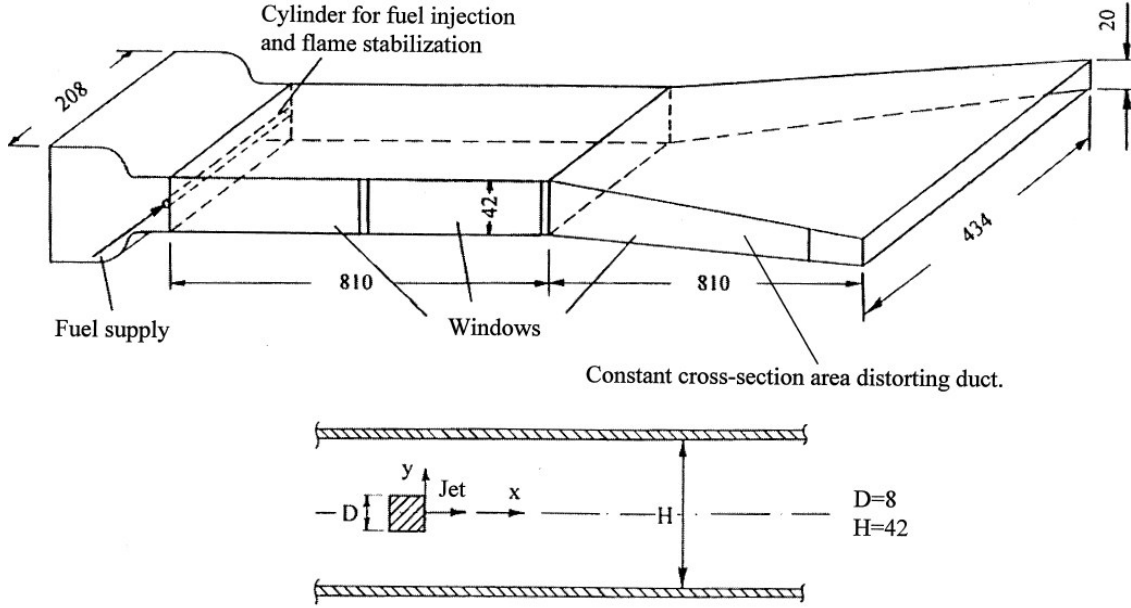
Çizelge 1.1 FLUENT programında izlenecek çözüm adımları için genel bir şema

Ağ yapısını girin	File menüsü
Ağ yapısını kontrol edin	Grid menüsü
Çözücü formülasyonunu seçin	Define menüsü
Basit eşitlikleri seçin	Define menüsü
Materyal özelliklerini seçin	Define menüsü
Sınır şartlarını belirleyin	Define menüsü
Çözüm kontrol parametreleri	Solve menüsü
Çözüm başlangıcı ve yakınsama ayarları	Solve menüsü
Çözümü hesaplatın	Solve menüsü
Sonucu gözden geçirin	Display/Plot/Report menüleri
Sonuçları save leyin	File menüsü
Ağ yapısı revizyonları	Adapt menüsü

## 2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1 SAYISAL BÖLÜMDE ELE ALINAN DENEY

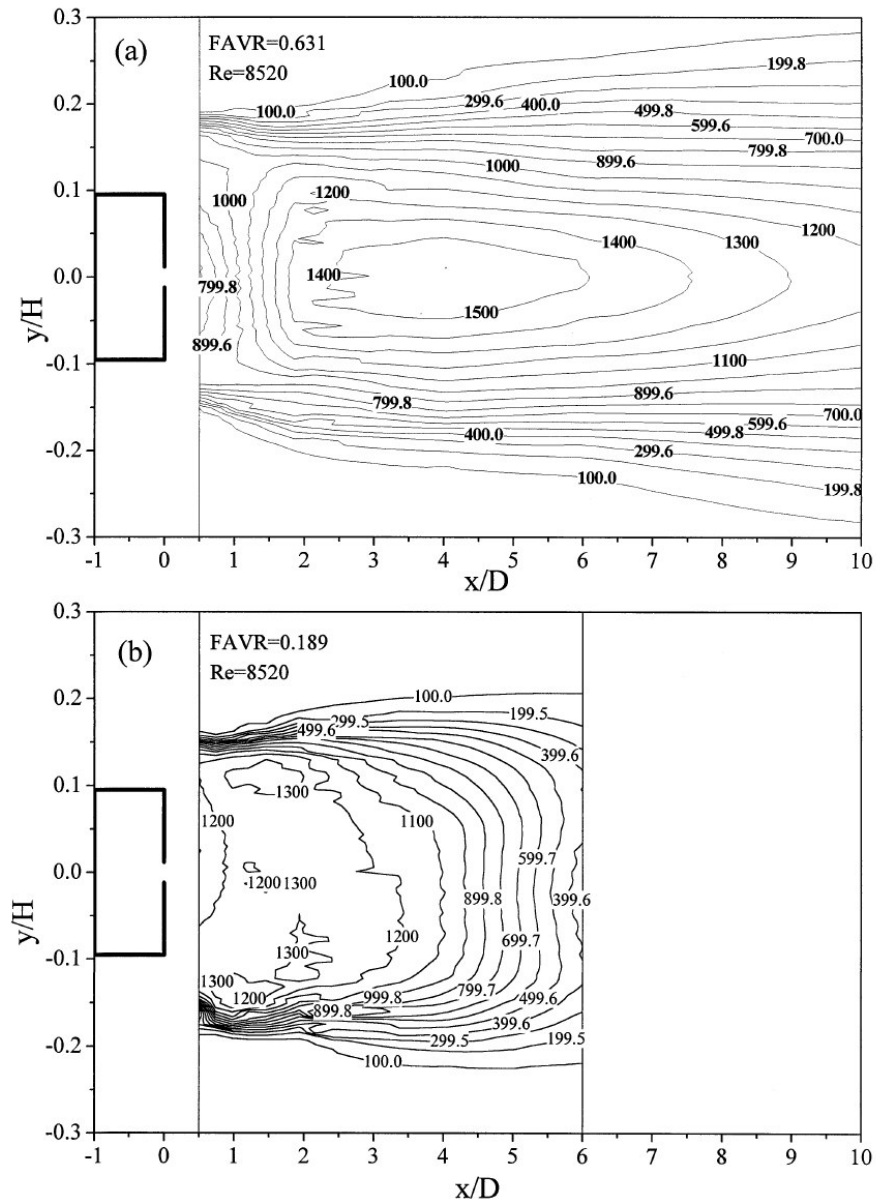
Tezin sayısal bölümünde (3. Bölüm) Yunanistan'ın Patras Üniversitesinde; A.G. BAKROZIS, D.D. PAPILIOU, ve P. KOUTMOS tarafından 1999 yılında yapılan deneydeki veriler baz alınmıştır. Deneyde girdap akımlı bölgeye 2 boyutlu silindirik nozülde yakıt enjekte edilerek elde edilen türbülanslı reaktif akış incelenmiştir. Deneyde ölçülen ortalama ve türbülans hızları ve sıcaklıklar, lazer hız ölçer ve dijital olarak kompanse edilmiş termokopulların yakıt-hava hız oranlarına (FAVR) göre oluşan akış bölgesine yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Ayrıca eşdeğer hava jetinin olduğu ve olmadığı izotermal akışlar da yanmanın türbülanslı akışa etkisinin anlaşılmasına yardımcı olmak için gösterilmiştir. Deneyde kullanılan yanma seti şekil 2.1 de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Test düzeneğinin şematik gösterimi

Kare kesitli yakıcı, 8 mm çapında ve 42 mm yüksekliğindeki kanalın içine yerleştirilmiştir. Deneyde gelen hava hızına bağlı olarak 8520 ve 14285 olmak üzere 2 reynolds sayısına göre inceleme yapılmıştır. Propan, şekil 2.1 deki kesitten birbirine çok yakın 125 delikten enjekte

edilmektedir. Yakııcı sayısal bölümde verilen tablo 3.1 deki gibi seçilen üç alev için yakıt-hava hızı oranı (FAVR) 0.189'dan 0.631'e kadar değişen durumlar için incelenmiştir. Çalışmada 2 boyutlu difüzyon alevlerinin aksimetrik benzerlerinden daha uzun geri akış alanları ve alev boyları meydana getirdiğini göstermektedir. Ayrıca bu alevlerin maksimum sıcaklıkları ve türbülans seviyeleri durgunluk bölgesinin hemen önünde oluştuğunu da göstermiştir. Deneyde elde edilen sonuçların bazıları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Ayrıca sayısal kısımda çözülen problem için elde edilen hız ve türbülans kinetik enerji profilleri de deneyde elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. (Bölüm 3)



Şekil 2.2 Deney için ortalama sıcaklık eğrileri (a)FAVR=0.631 ve (b)FAVR=0.189

## 2.2 BRÜLÖR PROBLEMLERİNİN HAD İLE ÇÖZÜMÜ

Son zamanlarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği aerodinamik ekipmanların dizayn ve işletmesinde kullanılan bir yöntem haline geldi. HAD endüstriyel brülörler gibi yakma ekipmanlarının analizinde kendine büyük bir yer edinmiştir. Bu geniş kullanılabilirlik, kimyasal reaksiyonlarla, türbülanslı akışkanlar mekaniği arasındaki lineer olmayan ilişkiye göre sınırlandırılmıştır. Smith (1992) endüstriyel problemlerde HAD'ın kullanımını sınırlayan nedenleri aşağıdaki gibi sıralamıştır.

- Reaktif sistemlerde ilgili fiziğin tam olarak anlaşılabilmesi
- Reaktif sistemlerde uzaysal ve geçici zaman skalalarında büyük farklılıklar olması
- Gerçek ocaklarda esas HAD kodlarının tam olarak incelenmesinin zor ve pahalı olması
- Tipik bilgisayar destekli yanma ekipmanları endüstriyel brülörler gibi yakma ekipmanlarının optimizasyonu için dizayn edilmemiştir.

Tüm bunlar mühendise yapay dizayn ve işletme problemlerinde HAD'ın efektif olarak kullanılmasında belirsizlikler yaratmaktadır. Smith ve Henke (2002) tarafından yapılan son çalışma, HAD odaklı ürünlerin ekonomik brülör dizaynında önemli bir yeri olduğunu göstermektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uzun zamandır uzay, otomotiv, elektronik gibi endüstrilerde sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda, HAD kimyasal proseslerde ve hidrokarbon proses endüstrisinde güvenilir bir problem çözücü araç olarak yer edinmiştir. Mühendisler brülör teknoloji dizaynlarında rutin olarak HAD'ı kullanmaya yakın bir zamanda başlamışlardır. HAD mühendise önceleri öngörülmesi imkansız ve pahalı test prosedürleri gereksinen işletme parametrelerini inceleme fırsatı sunmuştur.

Modelleme aracı olarak HAD kanıtlanmış bir araç olmasına rağmen limitsiz değildir. Bu limitler en fazla türbülanslı reaktif akışlarda öne çıkmaktadır. Ticari HAD kodları, kimyasal kinetikleri, kimyasal ürünleri yaklaşık olarak hesaplamada standart bir yaklaşım sunar. Bu basitleştirilmiş kimya, öngörülmuş akış modeli, ısı transferi hakkında yeterli bilgi verirken,

NOx ve CO2 üretimi konusunda isabetli bir yaklaşım yapma konusunda yeterli bir bilgiye sahip değildir. Alternatif olarak NOx kimyası ana hesaplamaları ayrı postprocessing tekniği ile elde edilmektedir.

Bilgisayar simülasyonları onaylanmış veriler ışığında yapıldığı oranda gerçekçidir. Çoğu uygulamada isabetli bir HAD modeli yaratmak için yeterli veri mevcut değildir. Fiziksel ve ölçülendirilmiş akış modellemesi akış öngörülerini onaylamaya yardımcı veriler sağlar. Buna ek olarak iyi kontrol edilmiş, tamamen ölçülendirilmiş brülör testleri brülör performansı öngörülerini elde etmek için kullanılır. HAD, soğuk akış modeli ve sıcak akış brülör testleri ile isabetli, ekonomik brülör dizaynı için güçlü bir analitik araçtır.

### 2.2.1 HAD'ın Önemli İçerikleri

HAD üç aşamaya dayanmaktadır. İlk olarak HAD hangi proses olursa olsun ilgili problemi fiziksel olarak kapsamlı olarak anlamayı gerektirir. İkinci olarak problemin fiziki yapısı matematiksel ifadelerle dönüştürülmelidir. Üçüncü olarak lineer olmayan matematiğin karmaşıklığına göre elde edilen denklemler nümerik algoritma kullanılarak çözülmelidir. HAD'ın efektif olarak kullanılması bu üç aşamaya bağlıdır. Bunlardan herhangi birinde bir hata, hatalı öngörülere ve sonuçlara yol açar. İdeal kullanım için mühendis fiziği, matematiği ve nümeriği simülasyon sonuçlarının gerçeği yansıtmadığını sorgulayabilmesi için iyi bir şekilde bilmelidir.

Uygun bir şekilde kullanıldığında HAD, brülör üretim zamanını azaltır, brülör verimini artırır ve brülörün ömrünün uzatır. HAD aynı zamanda işletme masraflarını azaltır, ürünün kar getirisini artırır, sistem optimizasyonunu dolayısıyla ürün kalitesini artırır.

Çizelge 2.1 HAD' da çözülen kartezyen diferansiyel denklemler

	$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{v}\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{w}\phi)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial(\phi)}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\phi \frac{\partial(\phi)}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial(\phi)}{\partial z}) = S_\phi$		
Denklemler	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
Süreklilik	1	0	0
X-momentum	$\tilde{u}$	$\mu_e$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial \tilde{w}}{\partial x}) + \bar{\rho}g_x - \frac{2}{3}\bar{\rho}\tilde{k}$

Y-momentum	$\tilde{v}$	$\mu_e$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y}) + \bar{\rho}g_y - \frac{2}{3}\bar{\rho}\tilde{k}$
Z-momentum	$\tilde{w}$	$\mu_e$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial \tilde{u}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial \tilde{v}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_e \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z}) + \bar{\rho}g_z - \frac{2}{3}\bar{\rho}\tilde{k}$
Karışım kesri	$\tilde{f}$	$\frac{\mu_e}{\sigma_f}$	0
Karışım varyansı	$\tilde{g}$	$\frac{\mu_e}{\sigma_g}$	$-\frac{C_{g1}\mu_e}{\sigma_g} + \left[ \left( \frac{\partial \tilde{f}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tilde{f}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tilde{f}}{\partial z} \right)^2 \right] - C_{g2}\bar{\rho}g \frac{\tilde{\epsilon}}{\tilde{k}}$
Türbülans enerji	$\tilde{k}$	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G - \bar{\rho}\tilde{\epsilon}$
Sönümlenme oranı	$\tilde{\epsilon}$	$\frac{\mu_e}{\sigma_e}$	$\left( \frac{\tilde{\epsilon}}{\tilde{k}} \right) (c_1 G - c_2 \bar{\rho} \tilde{\epsilon})$

$$G = \mu_e \left[ \left[ 2 \left[ \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y} \right)^2 \right] \right]$$

Model sunduğu veriler kadar iyi olduğu için, HAD en iyi deneylerle kontrol edilir. HAD komple fabrikasyon dizayn için gerekli bütün testlerin yerine sadece en önemli deneylerin yapılmasına yardımcı olur. Bu araştırmacıya onu sonucu götüreceği olan testlerde daha fazla zaman harcamasına izin verir. HAD, proses dizaynında ve optimizasyonunda temel bilgilerin pratik kullanımını artırarak teori ve pratik arasında bir köprü oluşturur.

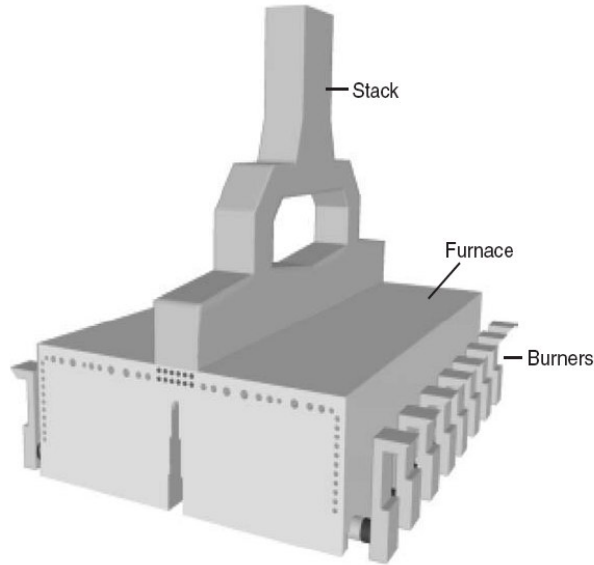
## 2.2.2 HAD Modellemenin Ana Hedefi

Endüstriyel brülör dizaynında HAD kullanmanın ana hedefi yeni teknoloji geliştirmek için gerekli maliyeti azaltmaktır. Yeni bir endüstriyel brülör dizayn ederken (belli performans standartlarını sağlayan, emisyon seviyesi azaltılmış alev boyu ve işletme stabilitesi gibi) iterasyona dayalı ortak bir test prosedürü uygulanır. Geçmiş tecrübeler bu prosesin 2 yıl gibi bir süre ve minimum 1 milyon dolar gerektirdiğini göstermektedir. Final prototipi üretildikten ve sahada uygulandıktan sonra brülör birçok modifikasyona uğrar. Bunun en iyi örneği John Zink PSMR brülörüdür. 1990'ların başlarında düşük NOx emisyonlu olarak geliştirilen brülör bugün sanayiye standart hale gelmiştir. Buna karşın ana dizayn bugünkü haline alana kadar birçok modifikasyona uğramıştır.

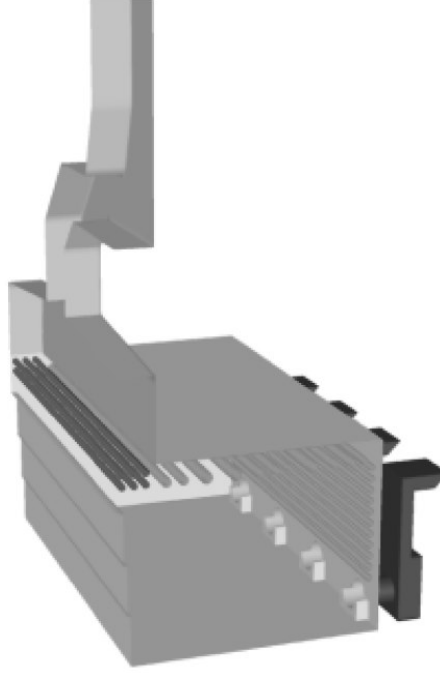
### 2.2.3 Hesap Alanı Seçimi

Bir endüstriyel brülör için HAD modeli geliştirmedeki ana problemlerden bir tanesi analiz için uygun hesap alanı seçimidir. Yeterli detaya sahip böyle bir sistem için analiz zamanı azaltmak için önerilen yaklaşımlardan bir tanesi simetri özelliğini kullanmaktır. Şekil 2.3 de simetri özelliğini kullanarak bütün hacmin sadece yarısının analiz edilmesi örnek olarak gösterilmiştir.

Basitleştirilmiş brülör modeli, HAD modelinin karmaşıklığını azaltmak için kullanılabilir. Bütün uygulamalarda, spesifik bir brülör için ne miktarda detay gerektiğini anlayabilmek için tecrübe gereklidir. Bazı uygulamalarda kişi tüm sistem geometrisini analiz etmeyi es geçebilir. Öte yandan başka bir kişi bilgisayar kaynaklarının pratik olarak elverdiği miktarda geometriyi analiz edebilir.



Şekil 2.3a Tipik endüstriyel ocak geometrisinin dış görüntüsü



Şekil 2.3b Simetri özelliği uygulanmış tipik endüstriyel brülör

#### 2.2.4 Sınır Şartlarının Seçimi

HAD simülasyonunu yapmadan önce kullanıcı, sistemin tüm sınırlarındaki şartları belirlemek zorundadır. Yani kullanıcı sisteme giren ve çıkanlarla birlikte sistem duvarlarındaki şartları da belirlemelidir. Genel olarak bu sınır şartları kütle, momentum ve enerji denklemlerinin birlikte çözülebilmesi için yeterli bilgiyi sağlamalıdır. Burada her bir denklem için bir adet sınır şartı gereklidir. Buna karşın üç momentum denkleminde kullanıcı her bir denklem için iki adet sınır şartı belirlemelidir. Tipik olarak giriş hızı, duvardaki hız ve merkez hızı (aksimetrik geometri) tanımlanır. Giriş hızı sabit tip sınır şartıdır. Aynısı kütle enerji denklemleri için de geçerlidir. Genel olarak aşağıdaki sınır şartları sistemi tam olarak tanımlamak için gereklidir.

1. Bütün giriş akımları karakterize edilmelidir. Kütleli debi, bileşim, basınç ve sıcaklıkla ilgili spesifik bilgiler bilinmelidir. Akış gaz-sıvı karışımından veya gaz-katı karışımından oluştuğu zaman bütün fazların yüzdesi bilinmelidir.
2. Yakma ünitesi standart işletme şartları belirtilmelidir. Bunlar, sistem basıncı, duvar sıcaklık parametreleri, ateşe dayanıklılık (duvar) kalınlığı, dış duvar sıcaklıkları ve iç duvar radyasyon parametrelerini kapsamalıdır.

3. Çıkış şartları, hız için akış şartlarını kapsayan şekilde belirtilmelidir.

### 2.2.5 Nümerik Analiz ve Hesap Ağları

Kapalı form matematiksel bağıntılar (kısmi diferansiyel ve integral form) mühendislik problemlerinin simülasyonunda ana elemanlardır. Bu teorik bağıntıların basit analitik çözümleri, çok basit geometriye sahip olanların dışında çoğu zaman problemlidir. Çözüm elde edebilmek için matematiksel ifadeler basitleştirilmeli fakat genel hesap alanının spesifik alt bölgelerini temsil eden ayrık noktalarda çözüm gerektiren benzer ayrık cebirsel ifadelere dönüştürülmelidir. Süreklilik denklemlerinin bu ayrık sayılardan yararlanılarak bu yer değiştirmesi ayrıklaştırma olarak adlandırılır. Bu ayrık noktalar grid noktaları olarak adlandırılır ve grid noktalarının birleşimi hesap ağını oluşturur. Hesap alanının hesabı bu ayrık noktalara indirildiğinde kapalı form matematiksel ifadeler, cebirsel denklem serileri ile ifade edilebilir. Bu her grid noktasındaki akış değişkenlerinin nümerik çözümünü mümkün kılar. Tanım olarak korunum bağıntıları kısmi diferansiyel denklem formunda kullanılıyorsa sonlu fark yöntemi olarak adlandırılır. Eğer integral formunda denklemler kullanılmışsa sonuç yöntemi sonlu hacim yöntemi olarak adlandırılır.

Sonlu hacimler yöntemi, çözülecek geometriyi parçalara bölerek bu parçaların her biri için çözüm yapma ve daha sonra bu çözümleri birleştirerek problemin genel çözümünün bulma ilkesine dayanır. Bölge ayrıklaştırılması ile sürekli bir ortam, sonlu sayıda düğüm noktalarından oluşmuş bir ağ şeklinde düşünülür. Akış denklemlerinin integrasyonu her kontrol hacminde yapılır ve bu integrasyon her bir kontrol hacminin karakterize eden denklemlerin ortaya çıkmasını sağlar. Her bir kontrol hacmini karakterize eden denklemlerin ortaya çıkmasını sağlar. Her bir kontrol hacmini karakterize eden bu denklemleri daha iyi incelemek için  $\phi$  gibi bir parametre tanımlanırsa, kararlı bir rejimde  $V$  gibi herhangi bir kontrol hacmi için akış denklemi (2.2) eşitliğindeki gibi olur. Bu denklem akışkanlar mekaniğinde genel formda süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin karakterize eder.

$$\vec{V} = V_r \vec{e}_r + V_\phi \vec{e}_\phi + V_z \vec{e}_z \quad (2.1)$$

$$\int v \phi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \int \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int S_\phi dV \quad (2.2)$$

Bu denklem hesaplama alanındaki her bir kontrol hacmine ve hücreye uygulanır.  $\Gamma_\phi$  ,  $\phi$  değişkenleri için difüzyon katsayılarını ve  $S_\phi$  ise her bir hacim elemanının kaynak terimini göstermektedir. Genel değişken  $\phi$ 'nin alacağı anlama göre değerler alırlar.

Kontrol hacmi temeli üzerinde her büyüklüğün korunumunu içeren ayrık denklemler elde edilir. FLUENT, birinci merteye (First Order Upwind), ikinci merteye (Second Order Upwind), hızlı (Quick) ve üssel (Power-Law) ayrıklaştırma yöntemlerinin kullanılmasına olanak tanır. Denklem ayrıklaştırılmasında diferansiyel veya integral yapıda olan denklemler düğüm noktalarındaki bilinmeyenleri içeren basit lineer denklemlere dönüştürülür. Akım alanının çözümü için oluşturulan bu lineer denklem sistemi çözülür. Bütün sayısal yöntemlerin temelinde akış denklemlerin sayısal olarak çözümünü sağlayacak, diferansiyel denklemlerin lineer denklemlere olan dönüşümü yatmaktadır.

Sonlu küçük hacimlere bölünen akış bölgesinde her bir sonlu hacimde her bir değişkene ait lineer formdaki korunum denklemleri (2.3) gibi yazılır;

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2.3)$$

Burada  $a_p$  merkezdeki hücreye ait katsayıyı,  $a_{nb}$  komşu hücreye ait katsayıyı, b ise üretimin ve sınır şartlarının sabit değerini ifade etmektedir. Lineer denklemlerin tümü iterasyon metodu ile çözülür, her iterasyon sonucunda  $\phi$  değişkeninin değişimi URF (Under Relaxation Factor) düzeltme katsayısı ile kontrol edilir. URF düzeltme katsayısı, denklemlerin lineer olmamasından dolayı ortaya çıkabilecek muhtemel hatalı çözümleri önlemek için  $\phi$  değişkeninin değişimini kontrol eden bir katsayıdır. İterasyon sırasında  $\phi$  değişkeni için denklem (2.3) deki eşitliğin iki tarafı arasındaki farkların tüm P hücreleri boyunca toplam değeri  $R^\phi$  ile gösterilir.

$$R^\phi = \sum_{\text{Phücreleri}} \left| \sum a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \phi_p \right| \quad (2.4)$$

Denklem (2.4) ile elde edilen artık değer çoğu zaman herhangi bir karşılaştırma ve oransallaştırma yapılmadığı için yakınsama değerlendirmesi yapmak için yeterli değildir. FLUENT bu artık değeri yakınsama kontrolü için (2.5) eşitliği yardımıyla oransallaştırır.

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{Phücreleri}} |\sum a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \phi_p|}{\sum_{\text{Phücreleri}} |a_p \phi_p|} \quad (2.5)$$

Momentum denklemlerinde paydaki  $a_p \phi_p$  yerine  $a_p U_p$  gelir. Nümerik çözümün yakınsayıp yakınsamadığı anlamak için kritik değer karşılaştırması yapılır.

$$\frac{R^\phi N_{\text{iterasyon}}}{R^\phi M_{\text{iterasyon}}} \leq 10^{-3} \quad (2.6)$$

(2.6) daki  $R_N^\phi$  değeri  $\phi$  değişkeninin N iterasyon sonundaki artık değeridir, paydadaki M değeri ise programda 5 değerine ayarlıdır ve  $R_5^\phi$  ilk beş iterasyondaki  $\phi$  değişkenine ait maksimum artık değerdir. Paydadaki M değeri Solve-Monitors-Residuals komutları ile çıkan arayüzde ‘normalize’ kutusu aktifleştirilerek değiştirilebilir. Eğer denklem (2.6) daki gibi boyutsuz artık değerler oranı kritik değerden küçük ise yakınsama vardır ve iterasyon durdurulur. Çözümün doğruluğu ve kararlılığı açısından artık değerler oranı en önemli göstergedir.

Hesap ağının herhangi bir noktasındaki çözüm ağı noktalarının sayısı ve yoğunluğu önemli geometrik özelliklerin çözümü için yeterli olmalıdır. Hesap alanının bir bölgesindeki çözüm ağı nokta yoğunluğu başka bir bölgeye göre çözümü kolaylaştırmak adına farklılık gösterebilir. Buna karşın grid aralıklarında bir bölgeden diğer bölgeye geçişte çok büyük farklılıklar olmaması nümerik stabilite açısından yararlıdır.

Belirli bir etki alanının geometrisini belirtmek için birkaç yaklaşım mevcuttur.

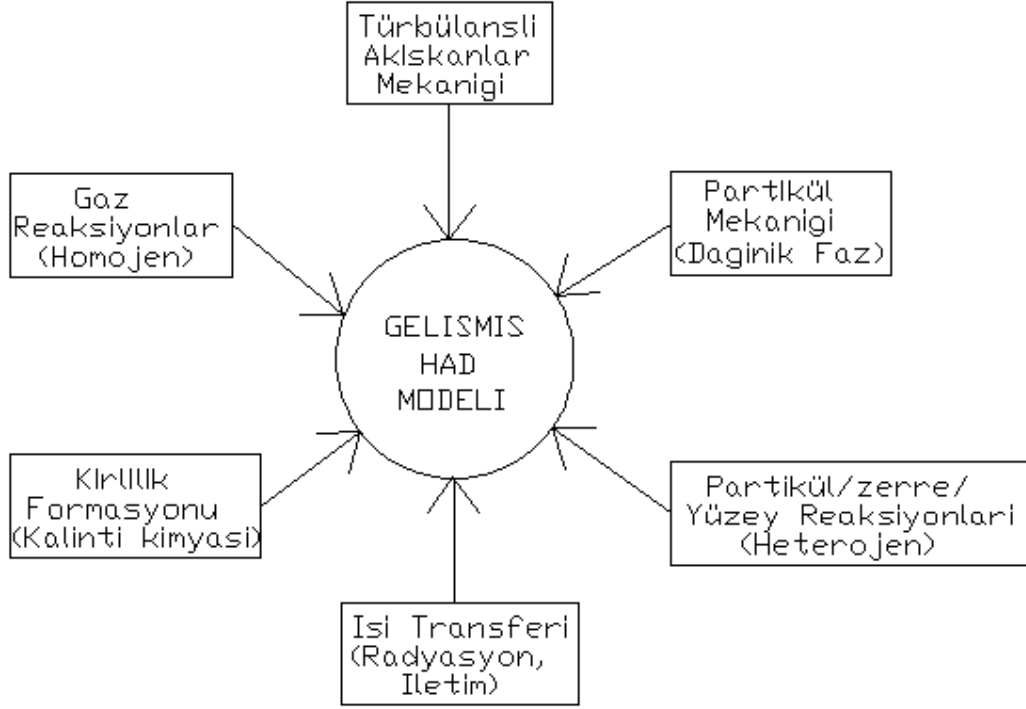
1. Düzgün aralıklı veya dik koordinat sisteminde yapılandırılmış çözüm ağı noktaları kullanmak.
2. Yapılandırılmamış ağ kullanmak

Genel olarak bilindiği üzere daha fazla grid yoğunluğu daha doğru simülasyon sonuçları üretir. Buna karşın belirli yapılandırılmamış çözüm ağı uygulamalarında ağ kalitesi güvenilir sağlıklı çözümler sağlaması kadar bireysel elementlerin şekliyle de ilgilidir. Çarpık açılı, tek yüzlü ve yüksek derecede eğimli olanlar kadar ince ve uzun elementler de hesaplamalarda önemli hatalara neden olabilirler.

### **2.3 HAD MERKEZLİ YAKMA MODELLERİNE BLOK OLUŞTURULMASI**

Endüstriyel brülörlerin türbülanslı yanma matematiksel simülasyonları yalnızca diferansiyel denklem setlerinin nümerik olarak çözümünün zor olmasıyla değil aynı zamanda bazı kimyasal ve fiziksel proseslerin tanımlanmasında karşılaşılan zorluklar (kimyasal-türbülans etkileşimi) nedeniyle de zor problemlerdir. Ticari HAD kodları mevcut akışkanlar mekaniği bilgisinin kabul edilebilir bir yaklaşımla kimyasal proseslerle birleştirilmesi sonucu oluşan matematik bilimine dayanır.

HAD kodları yanmanın olmadığı sistemler, gaz difüzyon yanması, pülverize edilmiş kömür-yakma sistemleri, zerrecik yanması, çamur yanması gibi sistemler için üretilmiştir. Bu kodlar endüstriyel brülör dizaynında kompleks geometriler oluşturmak için genel koordinat sistemlerinden yararlanırlar. Simetrik düzlemler tüm yakma sisteminin simülasyonu için gerekli hesap zamanını azaltmak amacıyla kullanılır. Modeller üç boyutlu, kararlı türbülanslı alevler için ortalama gaz ortam özelliklerini öngörürler. Bazı özel durumlar için çok fazlı yanma gereklidir. Bu durumlarda tanecik özellikleri (tanecik hızı ve sıcaklığı) ayrıca belirtilir. Şekil 2.2 kapsamlı bir HAD kodunun tipik alt model bileşenlerini tanımlamaktadır.



Şekil 2.4 Gelişmiş bir HAD kodunun tipik alt model bileşenleri

## 2.3.1 TÜRBÜLANSLI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ

### 2.3.1.1 Kapalı problemi

Akışkanlar mekaniğinin ana denklemleri şu üç fiziksel yasadandır türetilmiştir. Kütle korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu. Eğer yanma modeli için gerekli ek türler için çözüm yapılacaksa bu ek türler içinde korunum denklemleri gereklidir.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \quad (2.8a)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2.8b)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (2.9)$$

$\tau_{ij}$  = viskoz gerilme tansörü

$\delta_{ij}$  = Kronecker delta

$\mu$  = akışkanın moleküler viskozitesi

$\lambda$  = akışkanın hacim viskozite katsayısı

$\phi$  = transfer edilen değişkenler (kimyasal türler, entalpi vb.)

$\Gamma_\phi$  =  $\phi$  için moleküler difüzyon katsayısı

$\rho$  = akışkanın yoğunluğu

P = statik basınç

G = yerçekimi ivmesi

White (1974) hacim viskozite katsayısı ile ilgili tartışmalı da olsa altyapı bilgisi sağlamıştır.

Wilcox (1993)  $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$  denklemini önermektedir, bu denklemin manotomik gazlar için doğruluğunun kanıtlanmış olduğunu belirtmektedir.

Tennekes ve Lumley (1972) türbülansı tanımlamak için birçok karakteristik kullanmışlardır. Türbülans akışlar rastlantısal ve düzensizdir ve bu durum deterministik metodları zor hale getirmektedir. Türbülanslı yayılabilirlik, neredeyse her zaman moleküler yayılabilirlikten büyüktür. Bu durum türbülanslı akışlarda laminar akışlara göre daha yüksek mertebelerde momentum, ısı ve kütle transferini beraberinde getirir.

Yukarıda belirtildiği gibi rastlantısallık ve düzensizlik türbülansı karakterize eder. Türbülansı matematiksel olarak karakterize etmek için hız, basınç, sıcaklık vb. büyüklükler ortalama ve dalgalı bileşenler olarak belirtilmiştir. Denklem (2.7)-(2.9) nonlineer olduğundan denklemlerin zaman ortalaması alınca bilinmeyen yeni değişkenler ortaya çıkar. Bu bilinmeyen değişkenlerde modellenmelidir. Birçok mühendislik uygulamasında bilinmeyen değişkenleri hesaplamak için yarı deneysel türbülans modelleri kullanılmaktadır.

### 2.3.1.2 Favre ve Reynolds Ortalaması

Türbülans transferi momentum, enerji ve tür transport denklemlerinde bulunur ve her denklemdeki türbülans terimlerini düzgün olarak modelleyebilmek için türbülans kapanış modeli gerekmektedir. Bu noktada yönetici denklemlere (2.7 den 2.9'e kadar) ek olarak transport denklemleri türbülans kaynaklanan transport denklemlerini belirlemek için ortalaması alınmalıdır. Denklemleri çözmek için iki metod bulunmaktadır. Reynolds ortalaması ve Favre ortalaması. Wilcox (1993) her iki metod içinde inceleme yapmıştır. Favre ortalaması sıkıştırılabilirlik önemli bir sorun olduğunda uygulanabilir. Morkovin (1962) yoğunluktaki dalgalanmaların ortalama yoğunluğa göre küçük olduğunu varsaymıştır. Yanma ve önemli ısı transferi uygulamaları için yoğunluk dalgalanmalarının ortalama yoğunluğa göre ufak olmadığı apaçık ortadadır. Bu nedenle yanma ile ilgili akışları modellerken Favre ortalamasının tercih edildiği Wilcox (1993) tarafından belirtilmiştir. Hız için Favre ortalaması aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\rho} \lim_{T \rightarrow \infty} \int^i \rho u_i d\tau \quad (2.10)$$

Transfer edilen diğer değişkenlerin ortalaması (entalpi ve kimyasal tür gibi) denklem (2.10)' a benzer şekilde yapılır. Favre ortalaması süreklilik ve momentum denklemleri denklem (2.11) ve (2.12) daki gibidir.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_j u_i}) + \bar{\rho}g \quad (2.12)$$

Favre iterasyonu Reynolds gerilme tansörü şu denklemle verilir.  $\bar{\tau}_{ij} = -\overline{\rho u_j u_i}$

### 2.3.1.3 Türbülans Modelleri

En genel anlamda akışkan hareketleri, Navier-Stokes denklemleri ile tanımlanabilir. Bununla beraber, bu denklemlerin belirli bir takım kabuller yapılmadan analitik veya nümerik olarak çözümü günümüzde çok zordur. Akışın karakteristiği, boyutsuz olan Reynolds sayısının değerine bağlıdır. Reynolds sayısının değeri ise akışkanın fiziksel özelliği olan viskozite, akış hızı ve akış ortamını karakterize eden karakteristik uzunluğunun fonksiyonudur. Pratikte akışkan hareketi ile ilgili olarak karşılaşılan durum genellikle türbülanslıdır. Türbülanslı akışkan hareketinde, akışı oluşturan büyüklüklerin zaman ve konuma göre düzensiz değişimler göstermesi nedeniyle türbülanslı akışkanların çözümlenmesinde istatistiksel ortalamalı büyüklükler göz önünde bulundurulur. Navier-Stokes denklemlerini zaman ortalaması alınmış Navier-Stokes denklemlerine dönüştürebiliriz. Bu denklemlere RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemleri denir. Hareket denklemlerinin zaman ortalamasının alınması karşımıza yeni bilinmeyenler çıkarmaktadır. Bu ek terimler türbülanslı harekete ait gerilmelerdir. Bu ek terimleri hız ve basınç gibi ortalama akış büyüklüklerine bağlı olarak tanımlama işlemi türbülans modelleme olarak adlandırılmaktadır. Bu işlem kendine özgü bazı varsayımlar ve yaklaşımlarla yapılır. Türbülans modellemede ek gerilme terimlerinin yeni bağıntılar ile tanımlanması sonucunda türbülans kinetik enerjisi, bu enerjinin sönmüleme (yayıma) hızı gibi bazı yeni büyüklükler ortaya çıkar. Günümüzde bilinen bütün türbülans modellerinin geçerli olduğu akış koşulları ve türleri birbirinden farklıdır. Tek başına hiçbir türbülans modeli, bütün problemler için evrensel olarak üstün kabul edilmemiştir. Bir türbülans modelinin geçerliliği yapılan sayısal hesaplama sonuçları ile yapılan deneysel ölçümler karşılaştırılarak test edilir. Türbülans modeli seçimi, akışın kapsadığı fizik, belli bir sınıfa özgü kurulmuş uygulamalar, istenilen doğruluğun seviyesi, halihazırdaki hesaplama kaynakları ve simülasyon için eldeki zaman gibi birtakım faktörlere bağlıdır. Aşağıda bu tezde tercih edilen standart  $k-\varepsilon$  türbülans modeline yer verilmiştir.

#### 2.3.1.3.1 Standart $k-\varepsilon$ Modeli

Standart  $k-\varepsilon$  model taşınım denklemlerinin iki türbülans niceliği için (bu model için  $k$ :türbülansın kinetik enerjisi ve  $\varepsilon$ :türbülans sönmülemesi olmaktadır.) çözüldüğü iki denklemler sınıfına aittir. Model özellikle Reynolds kayma gerilmelerinin daha etkin olduğu sınırlanmış akışlar için iyi performans göstermektedir. Standart  $k-\varepsilon$  modeli

endüstrideki mühendislik uygulamaları için sıkça kullanılan oldukça popüler bir modeldir ve birçok ticari HAD kodunda mevcuttur. Tüm türbülans modellerinde olduğu gibi kavram ve ayrıntıları zamanla gelişim göstermiştir ve standart k- $\varepsilon$  model temelli çözüm modelleri türetilmiştir.

Türbülans hız ve uzunluk ölçeklerinin bağımsız olarak belirlenebilmesine izin veren iki ayrı taşınım denkleminin çözüldüğü iki denklemliler türbülansın en basit tam modelleridir. Launder ve Spalding (1972) tarafından ortaya konulduktan beri kullanışlı olarak mühendislik akış hesaplamalarında çokça yararlanılan bir türbülans modeli olmuştur. Türbülanslı akışların geniş bir kısmında sağlamlık, ekonomiklik ve makul bir doğruluk sunması endüstriyel akış ve ısı transferi simülasyonlarındaki popülaritesini açıklamaktadır. Yarı deneysel bir modeldir ve model denklemlerinin elde edilmesi fenomenolojik faktörlere bağlıdır. k- $\varepsilon$  modeli sabitlerinin değerleri genel kabul görmüş değerler olup, herhangi özel bir akış için sabitlerin değiştirilmesi doğruluğu artırabilir. Büyük Reynolds sayılarında standart k- $\varepsilon$  modelinde duvar boyunca model denklemlerinin integrallerinden kaçınılmıştır. Model bazı akım alanlarında daha zayıf bir yaklaşıma sahiptir. Bazı sınırlanmamış akımlar, girdap akımları gibi ilave zorlanmaların bulunduğu akımlar bunlara örnektir. Standart k- $\varepsilon$  modeli denklemleri aşağıda görülmektedir.

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] : \text{Türbülans kinetik enerji} \quad (2.13)$$

$$\rho U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] : \text{Sönümleme oranı} \quad (2.14)$$

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} : \text{Eddy viskozite} \quad (2.15)$$

### 2.3.1.3.2 k- $\varepsilon$ Türbülans Modeli Sınır Şartları

k- $\varepsilon$  türbülans modeli için tespit edilen sınır şartları, logaritmik tabakadaki sınır tabaka momentum denkleminin büyüklük analizinden gelir. Logaritmik tabaka viskoz alt tabaka ile hız azalması (velocity defect) tabakası arasında ara bir bölgedir. Burada duvar yasaları geçerlidir. Sınır tabaka momentum denkleminin büyüklük analizi, taşınım, basınç gradyanı ve moleküler difüzyonun ihmal edilebileceğini ileri sürer. Bu basitleştirmeleri k ve  $\varepsilon$  için transport denklemlerine uyarlırsak sınırlardaki k ve  $\varepsilon$  ilişkisi duvar fonksiyonlarındaki gibidir. Standart duvar fonksiyonları denklem 2.16 ve 2.17 de verilmiştir.

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} : k \text{ için standart duvar fonksiyonu} \quad (2.16)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2} C_\mu^{3/4}}{K y} : \varepsilon \text{ için standart duvar fonksiyonu} \quad (2.17)$$

$u_\tau$  = sürtünme hızı

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$\tau_w$  = duvar kayma gerilmesi

K= Karman sabiti (K  $\approx$  0.4)

y = duvardan normale göre uzaklık

Duvar fonksiyonları (2.16 ve 2.17 ) duvara bitişik düğüme uygulanır. Duvar yasası (2.18) sürtünme hızını bulmak için duvara bitişik düğüme ve sonrasında duvar fonksiyonları k ve  $\varepsilon$  u belirtmek için kullanılır.

$$U = u_\tau \left[ \frac{1}{k} \ln \left( \frac{u_\tau y}{\nu} \right) + B_1 \right] \quad (2.18)$$

U= ortalama hız

$\nu$  = kinematik viskozite

$B_1 = \text{sabit}$

Eğer yüzey pürüzsüzse, denklem (2.18) kullanılabilir; buna karşın eğer yüzey pürüzsüz değilse, Nikuradse tarafından geliştirilen denklem (2.19) kullanılır.

$$U = u_\tau \left[ \frac{1}{k} \ln \left( \frac{y}{k_s} \right) + B_2 \right] \quad (2.19)$$

$k_s = \text{yüzey pürüzlülük değeri}$

$B_2 = \text{sabit}$

Wilcox (1993) nümerik çözümlerin yüzeye bitişik düğümlerin yerine göre hassas olduğunu belirtmiş ve yakın duvar çözüm ağlarının kullanılmasını önermiştir. Duvar fonksiyonlarını kullanırken karşılaşılan bir diğer problem teorik olarak duvardan ayrı akışlar için uygulanmamalarıdır. Son olarak Wilcox standart duvar fonksiyonlu standart  $k-\varepsilon$  modelinin ters basınç gradyanlı sınır şartlarında iyi sonuç vermediğini belirtmiştir. Kim ve Choudhury (1995) standart  $k-\varepsilon$  duvar fonksiyonlarına ters basınç gradyanlarını hesaplayabilmek için modifikasyonlar önermişlerdir.

### 2.3.2 HOMOJEN KİMYA

Genel olarak yanma prosesinin matematiksel olarak modellenmesi birçok fiziksel ve kimyasal prosesi içine almaktadır. Herhangi bir reaksiyon ve yanma prosesini türbülanslı akış olarak modellemek son derece zahmetlidir. Genel olarak alev tipleri için aşağıdaki ayrımlar yapılabilir.

- Ön karışımli alevler
- Kısmi önkarişimli alevler
- Önkarişimsiz veya difüzyon alevleri

Reynolds, Domkoehler ve Karlovitz sayılarına bağlı olarak, daha ileri ayrımlar laminer, türbülanslı, buruşuk, dalgalı alevler ve homojen reaksiyon zonları olarak yapılabilir. Pratik

yanma uygulamalarının büyük ölçüde türbülanslı olmasından dolayı burada laminar alev modelinden bahsedilmeyecektir.

Türbülanslı alevin tipi hangi yanma alt modelinin kullanılacağını belirler. Ön karışımli alevler için aşağıdakileri içeren modeller mevcuttur.

- İlerleme değişkeni C
- Alev önü G için transport denklemi
- Girdap kırılma (EBU), girdap sönümlü yanma modeli (EDX) ve girdap sönüm konsepti (EDC)
- Kısmi önkarişimli kimyasal dengeli pdf model

Ön karışimsız yanma için şu modeller mevcuttur.

- Kimyasal dengeli farzedilmiş pdf ( adyabatik ve adyabatik olmayan)
- Sonlu oranlı farzedilmiş pdf (flamelet model)
- Girdap sönümlü yanma modeli

Girenleri A ve B, ürünleri C ve D olan bir reaksiyon için genel denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.



$v$  = stokiometrik katsayı

Örnek olarak metan yanmasında, genel bir adımlı denklem şöyledir:



Reaksiyon oranı katsayısının ürünleri ve bütün katılan türler için reaksiyon oranı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$r_i = \left( \frac{dc_i}{dt} \right) = kc_1^{a1} c_2^{a2} c_3^{a3} \dots c_N^{aN} \quad (2.22)$$

Reaksiyon katsayısının  $k$ , reaksiyon sırasının  $a$ , ve türlerin  $c_i$  olarak tanımlandığı bir yerde her bir türün (i) konsantrasyonu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$c_i = \frac{\rho_i Y_i}{M} \quad (2.23)$$

M: Ortalama molar karışım kütlesi

Katsayı oranı  $k$  genel olarak şöyle yazılır.

$$k = AT^m e^{\left(-\frac{E_A}{RT}\right)} \quad (2.24)$$

R: Gaz sabiti (8.3143 kJ/mole-K)

A: Arrhenius faktör A

m: Sıcaklık üssü

$E_A$ : Aktivasyon enerjisi

Bütün basit reaksiyonlardaki (k) türlerin (i) konsantrasyonlarındaki değişiklik için son formülasyon şöyledir.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \sum_{k=1}^M (v_{i,k}'' - v_{i,k}') (AT^a)_k \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \prod_{j=1}^N \left(\frac{\rho Y_j}{W_j}\right)^{v_{j,k}'} \quad (2.25)$$

Ve reaksiyon oranı olarak;

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} W_i = \dot{Y}_i = W_i \sum_{k=1}^K v_{ik} r_k \quad (2.26)$$

Ve son olarak enerji korunumu denklemi için ek kaynak terimi toplam açığa çıkan enerji, reaksiyon ürünlerinin toplam entalpisi H ve türlerin konsantrasyon değişimlerine bağlı olarak şu şekilde yazılır.

$$q_r = \sum_{k=1}^K q_k = \sum_{k=1}^K - \left( \frac{\Delta H_k}{v_{i,k}} \right) \left( \frac{dc_i}{dt} \right)_k = - \sum_{i=1}^N h_i w_i \quad (2.27)$$

Tür transportu için yönetici denklem ;

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho Y_i + \nabla \cdot (\rho \bar{u} Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \dot{Y}_i \quad (2.28)$$

$Y_i$ : Türler için kaynak terim

Girdap kırılma modeli (EBU) Spalding (1971) tarafından tersinir olmayan türbülanslı, ön karışım alevli tek adımlı reaksiyonların hesaplanması için geliştirildi. Buradaki varsayım reaksiyon oranı ya yanmamış yakıt veya yanmış sıcak gazların bulunduğu ya da girdapların sönümü ile kontrol ediliyor olduğu idi.

Yanmamış karışımın reaksiyon oranı  $Y_F$ , denklem (2.28) da kullanıldığı gibi, bu girdapların dağılım oranı ile tanımlanır.

$$\dot{Y}_{F,eddy} = C(1 - \tau) \rho \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (2.29)$$

Gerçek yakıt tüketim oranının hesaplayabilmek için, aşağıdaki gibi tanımlanan kinetik olarak kontrol edilen reaksiyon oranını hesaba katmak gerekir.

$$\dot{Y}_{F,kin} = A Y_F Y_{O_2} \exp(-E_A / RT) \quad (2.30)$$

A: Ön üstel faktör

$E_A$ : Aktivasyon enerjisi

R: Üniversal gaz sabiti

Gerçek yakıt tüketim oranı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{Y}_{F,actual} = \frac{1}{\frac{1}{\tau \dot{Y}_{kin}} + \frac{1}{\dot{Y}_{eddy}}} \quad (2.31)$$

Bu yaklaşımın en büyük sakıncası, homojen dağıtım kabulü ve yakıt ile havanın mükemmel karışım kabulüdür. Denklem sadece türbülanslı homojen dağılımlı önkarişimli alev için geçerlidir.

EBU modelinin geliştirilmiş hali, Magnausen (1977) tarafından formüle edilen girdap dağılma yanma modelidir. Magnausen saf yakıt ve oksitleyici almış ve yakıt ve oksijen girdaplarının moleküler düzeyde türbülanslı olarak birbirine karıştırılarak yanma oranının elde edilebileceğini varsaymıştır. Reaksiyon oranı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{Y}_i = C\bar{Y}_i \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.32)$$

C: Alevin yapısına bağlı sabit

$\bar{Y}_i$  : Zaman ortalamalı konsantrasyon

Bu yaklaşım saf yakıt oksitleyici ve sıcak ürünler için onaylanmıştır, bu nedenle ön karışimsız alevlerin hesaplamaları içinde uygundur. Gerçek reaksiyon oranı belirtilen kriterlerin minimumu ile ifade edilir.

1. Reaksiyon oranı yakıt konsantrasyonu ile belirtilir.

$$\dot{Y}_F = A\bar{Y}_F \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.33)$$

A= 4.0

$\bar{Y}_F$  : Zaman ortalamalı yakıt konsantrasyonu

2. Reaksiyon oranı oksijen konsantrasyonu ile ifade edilir.

$$\dot{Y}_{O_2} = a \frac{\bar{Y}_{O_2}}{r_{O_2}} \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.34)$$

$Y_{O_2}$  : lokal ortalama oksijen konsantrasyonu

$r_{O_2}$  : Stokiyometrik oksijen gereksinimi

3. Reaksiyon oranı sıcak ürünlerin varlığı ile sınırlıdır.

$$\dot{Y}_{Pr} = AB \frac{\bar{Y}_{Pr}}{1 + r_{O_2}} \frac{\epsilon}{k} \quad (2.35)$$

A= 4.0

B= 0.5

$Y_{Pr}$  : Lokal ortalama ürün konsantrasyonu

$r_{O_2}$  : Stokiyometrik oksijen gereksinimi

Bu yaklaşımın dezavantajı, genel reaksiyonlar hala kullanılmak zorundadır. Bu modelin uzantısı girdap sönümleme konseptidir (EDC). Bu model hala türbülanslı kaskad enerji boyunca girdap sönümlemeye dayanmaktadır. Fakat kimyasal reaksiyon bölgeleri, düzgün yapılı ve onu çevreleyen yanmasız bölgeler ile ayrılmıştır. Bu düzgün yapılar, türbülanslı enerji kaskadının sonunda bulunmaktadır. Bu iyi yapıların içindeki kimya kusursuz bir harekete geçirici reaktör gibi davranır.

Magnaussen (1977), bu iyi yapılarda bulunan kütle kesrini aşağıdaki gibi belirtmiştir.

$$\gamma = (u^* / u')^3 \quad (2.36)$$

$u^*$  : düzgün yapıdaki karakteristik hız

u: türbülans hızı

Bu düzgün yapılara onu çevreleyen reaktif olmayan akışkan kütle transferi şu ifadeyle gösterilir.

$$\dot{m} = 2 \frac{u^*}{L^*} \gamma^* \quad (2.37)$$

$u^*$  : karakteristik hız

$L^*$  : Karakteristik uzunluk

Karakteristik hız ve uzunluk şu şekilde ifade edilir.

$$u^* = 1.74(v\mathcal{E})^{1/4} \quad (2.38)$$

$$L^* = 1.42v^{3/4} / \mathcal{E}^{1/4} \quad (2.39)$$

$v$  : kinematik viskozite

$\mathcal{E}$  : Türbülans enerjisi sönmleme oranı

İzotropik türbülans yaklaşımı yaparak düzgün yapının kütle kesri ve düzgün yapı ve çevresi arasındaki kütle transferi şu şekilde yazılabilir.

$$\gamma^* = 9.7\left(\frac{v\mathcal{E}}{k^2}\right)^{3/4} \quad (2.40)$$

Kütle transferi için;

$$\dot{m} = 23.6\left(\frac{v\mathcal{E}}{k^2}\right)^{1/4} \frac{\mathcal{E}}{k} \quad (2.41)$$

Eğer düzgün yapı içerisindeki reaksiyonların sonsuz hızlı olduğunu varsayarsak çevreleyici akışkan ve düzgün yapı arasındaki kütle transferi reaksiyon oranını sınırlar. Buna göre reaksiyon oranı kütle transferine bağlı olarak şu şekilde yazılır.

$$\dot{Y}_F = 23.6\left(\frac{v\mathcal{E}}{k^2}\right)^{1/4} \frac{\mathcal{E}}{k} \bar{Y}_{\min} \quad (2.42)$$

$Y_{\min}$  :  $Y_F$  veya  $Y_{O_2}$  'nin en küçük konsantrasyonu

Bütün düzgün yapılar aynı sıcaklıkta kabul edilemez, dolayısıyla sıcak ürünlerin konsantrasyonları hesaba katılmalıdır. Düzeltme katsayısı;

$$\chi = \frac{\bar{Y}_{Pr} / (1 + r_{O_2})}{\bar{Y}_{Pr} / (1 + r_{O_2}) + Y_F} \quad (2.43)$$

Bu şekilde tanımlanır ve reaksiyon oranı için denklem son olarak şu hali alır;

$$\dot{Y}_F = 23.6 \left( \frac{\nu \mathcal{E}}{k^2} \right)^{1/4} \frac{\mathcal{E}}{k} \chi \bar{Y}_{\min} \quad (2.44)$$

Bu yaklaşımın ana avantajı düzgün yapıların kinetiklerini tanımlamak için basit reaksiyonlar içermesi olasılığıdır. Verilen herhangi bir reaksiyon sadece bu küçük bölgelerde çözülebileceğinden hesap zamanı önemli ölçüde azalır. Reaktif akışlar için bir başka hesap yöntemi de karışım kesri yaklaşımıdır.

### 2.3.3 DUVAR ISI TRANSFERİ

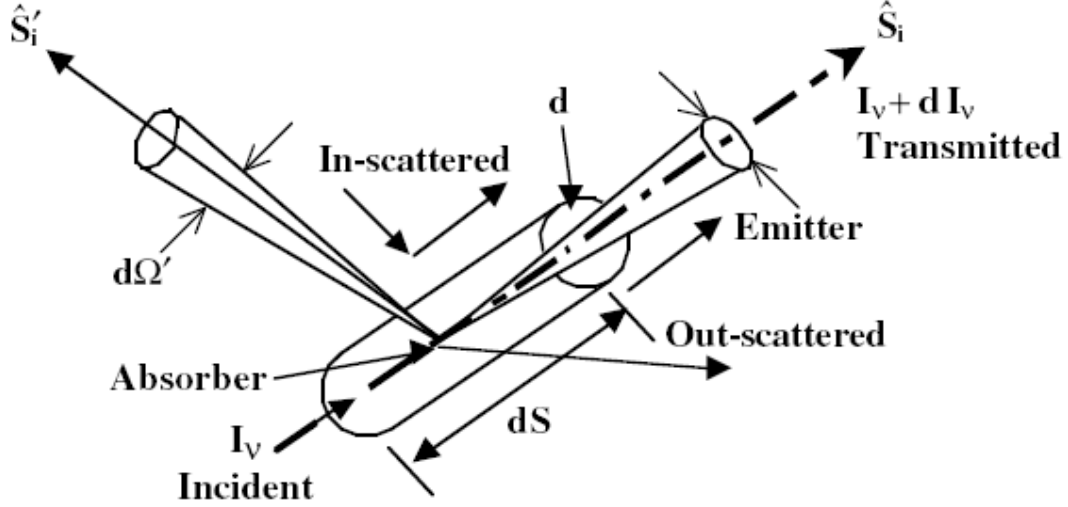
Brülör alevi ile ocağın duvarları veya boruları arasındaki ısı transferi ocak veriminin optimizasyonu için HAD simülasyonu tarafından çözülmesi gereken bir konudur. Termal verim olarak adlandırılan ocağa transfer olan enerjinin, yakıtın toplam enerjisine oranı endüstriyel ocak için radyasyonla ısı transferine bağlıdır ve önemli bir araştırma konusudur.

Radyasyon transferi teorisi yoğunluğun yayılması ile ilgilidir. Shuster (1905) ve Hamaker (1947) radyasyon prosesini pozitif ve negatif koordinatlarda , pozitif radyasyon akısının değişim oranı için denklemler yazarak ifade eden ilk iki araştırmacıdır. Temel radyasyon denklemi aşağıdaki gibidir.

$$(S \cdot \nabla) l_v = -(K_{av} + K_{sv}) l_v + K_{av} I_{b,v}(T) + \frac{K_{sv}}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} P_v(\vec{S} \rightarrow \vec{S}') l_v(S') d\Omega' \quad (2.45)$$

Şekil 2.5 belirli bir yönde radyant enerji balansını anlatmaktadır. Denklem (2.45)' in sol yanı radyasyon yoğunluğunun net olarak değişimini simgelemektedir. Sağ taraftaki ilk terim yutma ve saçma için azalmayı, ikinci terim ise yayılmadaki artışı göstermektedir. Son olarak, integral terimi saçmadaki artışı göstermektedir. Bu terim ayrıca kaynak terim olarak

bilinmektedir ve çözülmesi çok zor olan bir denklemdir. Bu denklemleri basitleştirmek için, kaynak terim çeşitli yaklaşımlar yapılarak diferansiyel forma indirgenir.



Şekil 2.5 Belirli bir yönde radyant enerji dengesi

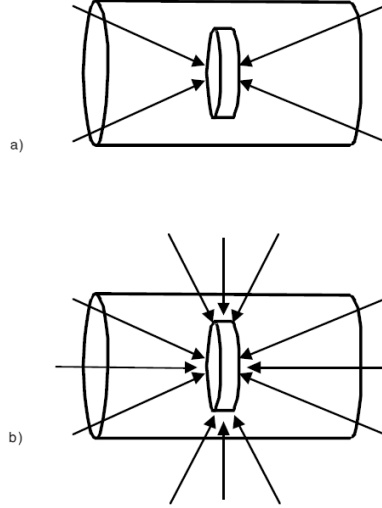
Gaz ve yağ yakıtları ve pulverize edilmiş kömür yakmalı ocaklar için radyasyonla ısı transferi bölgelere ayırma metodu ve akı metodu kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar sıcaklık, ısı açığa çıkma oranı ve gaz konsantrasyonları için basit deneysel kabuller kullanırlar. Bu kabuller ayrı yöne ait akılar arasında bağ kurma konusunda yetersizdir. Bu etkileri minimize etmek için geliştirilen diğer bilgisayar teknikleri Monto Carlo method, difüzyonal metod ve günümüzde daha çok kullanılan ayrık ordinatlar metodudur.

Bölgesel metodlar ilk olarak 1958 yılında Hottel ve Cohen tarafından ocaktaki radyasyon transferinin simülasyonunu yapmak için geliştirilmiştir. Bu metod akı metodundan endüstriyel ocaklarda yanmada ve radyasyonla ısı transferinde daha güvenilir bir metoddur.

Akı temelli radyasyon modelleri ilk olarak Gosman ve Lockwood (1972) ve Varma (1979) tarafından geometrik olarak basit sistemler için radyasyon transferini iki, dört ve altı yönlü akı denklemleri ile çözümlerler. Günümüzde hem akı hem de bölgesel metodlar yönsel akılar arasında bağlantı kurmadaki yetersizlikleri nedeniyle pek kullanılmamaktadırlar.

Yönsel akılar arasında ilişki kurabilen metodlardan bir tanesi Monto Carlo metodudur. Bu metod gaz problemlerinde güçlü ve esnek çözüm sunmasına karşın bilgisayar zamanı açısından zaman alıcıdır. Bu yüzden ayrık ordinatlar metodu daha çok tercih edilen bir metodur.

Ayrık ordinatlar metodu radyasyonla ısı transferi denklemlerini yutma-yayma ve saçma ortamlarını  $S_2$ ,  $S_4$ ,  $S_6$  ve  $S_8$  yaklaşımları için çözmek için geliştirilmiştir.  $S_4$  yaklaşımı radyasyon transport denklemlerini 24 yön için çözmektedir. Bu method, iki boyutlu aksimetrik geometriler, iki boyutlu kartezyen geometriler, üç boyutlu dikdörtgen geometriler ve üç boyutlu genel şekilli geometriler için test edilmiştir. Gerçek sonuçlarla karşılaştırıldığında  $S_2$  kabulü önemli hatalar gösterirken,  $S_4$  kabulü yeterli sonuçlar vermektedir. Günümüzde HAD merkezli yanma modelleri radyasyonla ısı transferini tahmin edebilmek için ayrık ordinatlar metodunun  $S_4$  kabulünü kullanmaktadır.



Şekil 2.6 Bir hacime ulaşan yönsel şiddetler (a)  $S_2$  (b)  $S_4$

### 3. SAYISAL ÇALIŞMALAR

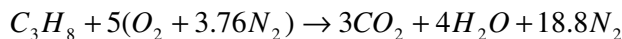
Bu bölümde reaksiyonun olduğu durum (Problem1) ve izotermal durum (Problem 2) olmak üzere iki ayrı problem FLUENT programı yardımıyla incelenmiştir. Kullanılan çözüm yöntemlerinden bahsedilmiş ve çözüm algoritmaları sunulmuştur. Çözümlerin daha önce yapılmış deneysel ve nümerik çalışmalarla karşılaştırılmalarının yapılabilmesi için ilgili veri dosyaları EXCEL programına aktarılmış ve çizdirilen grafikler üzerinden yorum yapılmıştır.

#### 3.1 Reaksiyonel Durum ( Problem 1 )

##### 3.1.1 Problemin açıklanması

Ele alınan 2 boyutlu brülör şekil 3.1 de görülmektedir. Alev türbülanslı difüzyon alevi olarak düşünülmüştür. Farklı hava-yakıt oranlarına sahip üç alev için inceleme yapılmıştır. Yakıcının ortasında bulunan silindirik nozülde Tablo 3.1 de verilen hızlarla yakıt enjekte edilmektedir. Hava yakıcıya yine Tablo 3.1 de verilen hızlarla eşeksneli olarak girmektedir. Bölüm 2.1 de anlatılan deneyde yakıt 155 mm uzunluğundaki silindirik nozülde birbirine yakın 125 delikten enjekte edilmiştir. Problem çözülürken yakıtın 0,2 mm kalınlıklı iki boyutlu bir yarıktan enjekte edildiği varsayılmıştır. Buna göre deneyde verilen hava debisi ve yakıt debisine göre yeni bir yakıt hızı hesaplanmıştır. Deneyle problemde ele alınan veriler karşılaştırıldığında hava-yakıt debi oranı (FAR) aynı alınmış fakat ele alınan modeldeki farklılıktan dolayı hava-yakıt hızı oranı (FAVR) farklılık göstermiştir. Daha sonra deneyde kullanılan hava-yakıt hızı oranlarına göre problem tekrar çözülmüş ve iki durum birbiri ile kıyaslanmıştır.

Propanın tam (stokometrik) yanması için gerekli hava yakıt oranı (HY) aşağıda hesaplanmıştır. Buna göre deneyde verilen hava yakıt oranlarına göre hava fazlalık katsayısı (n) tablo 3.1 de gösterilmiştir.



$$HY = \frac{(5 \times 4.76 \text{ kmol}) \times (29 \text{ kg / kmol})}{(3 \text{ kmol} \times 12 \text{ kg / kmol}) + (4 \text{ kmol} \times 2 \text{ kg / kmol})} = 15.69 \frac{\text{kg hava}}{\text{kg yakıt}}$$

Çizelge 3.1 Sayısal çözümde kullanılan probleme ait parametreler

Alev	$m_f$ (kg/h)	$m_a$ (kg/h)	n	FAR ( $\times 10^{-3}$ )	$U_f$ (m/s)	$U_a$ (m/s)	FAVR
A	2	567	18	3.527	13	16.7	0.631
B	2	951	30	2.103	13	28	0.375
C	0.6	567	60	1.058	3.9	16.7	0.189

Problemde kullanılan göre geometriye göre yakıt hızının hesaplanması A alevi için aşağıda gösterilmiştir. Sırasıyla A, B ve C alevleri için yakıt hızları 9.4, 9.4 ve 2.8 olarak bulunmuştur. Bu duruma göre elde edilen FAVR oranları sırası ile 0.46, 0.27 ve 0.14 'tür.

$$m_f = \rho_f \times A_f \times U_f \quad (3.1)$$

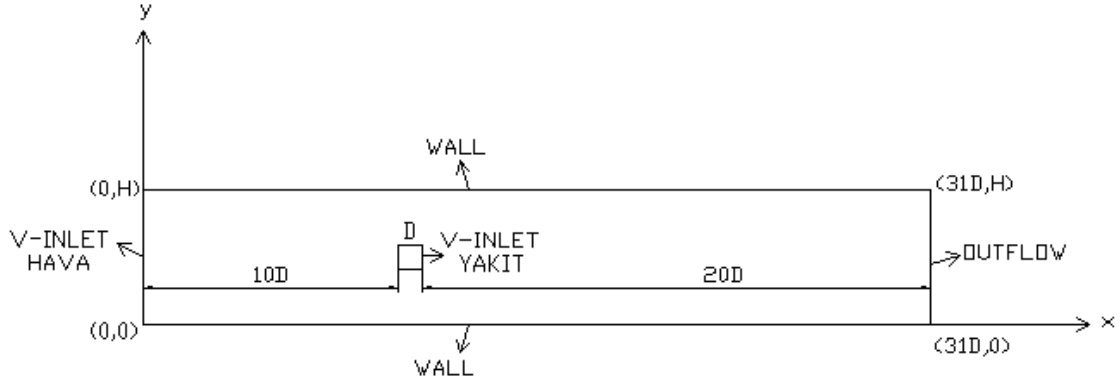
$$\frac{2}{3600} = 1.9 \times (0.155 \times 0.0002) \times U_f$$

$$U_f = 9.4 \text{ m/s}$$

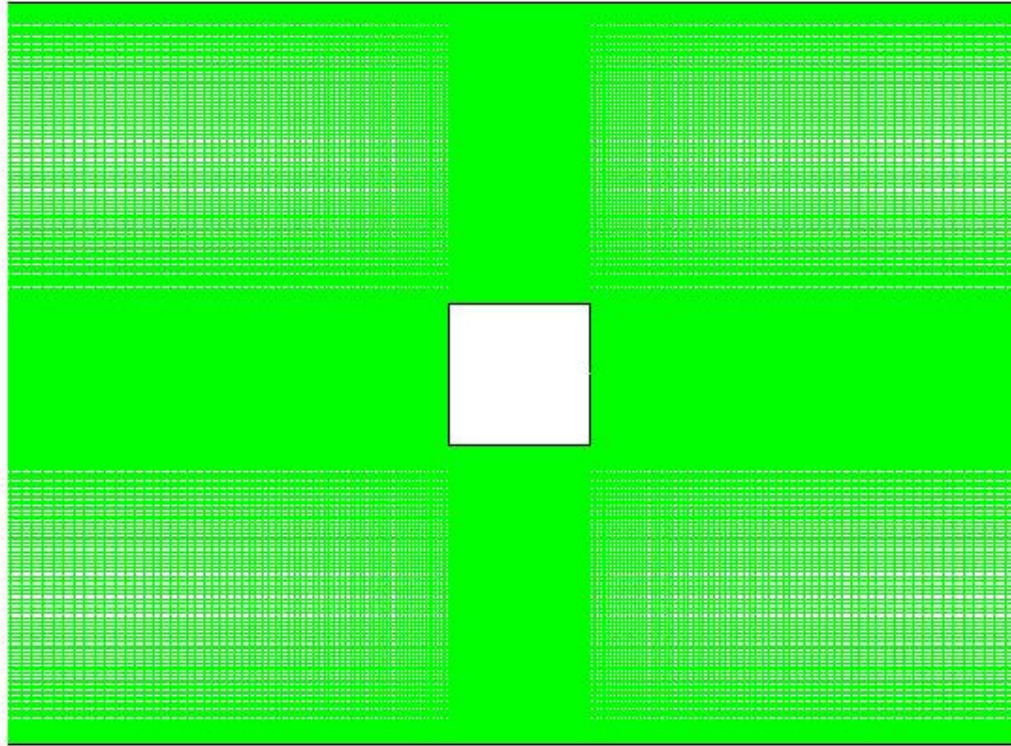
### 3.1.2. Sayısal Çözüm Alanının Tanımlanması

Problemın önemli özellikleri belirlendikten sonra sıra model geometrisinin ve ağ yapısının oluşturulmasına gelmiştir. Bu problem için GAMBİT programı kullanılmıştır. Problem 2 boyutlu olarak modellenip çözümlenmiştir. Modellemede dikkat edilen husus nozule ve duvarlara yakın bölgelerdeki oluşumları incelemek istediğimiz için bu bölgelerdeki ağ yapımızı daha sık tasarlamamız gerekmesidir.

Şekil 3.1 deki sınır şartları ve koordinatlar ile 2 boyutlu dikdörtgenel bir çözüm ağı oluşturulmuştur. 248 mm uzunluğunda 42 mm genişliğindeki bu dikdörtgen yüz Gambit programında çizilmiştir. Başlangıç noktasından 10D uzaklıkta 8 mm çapında nozül çizilmiştir. Duvarlara ve nozule yakın nokta sayısının fazla olması için bu noktalarda daha sık ağ tercih edilmiştir.



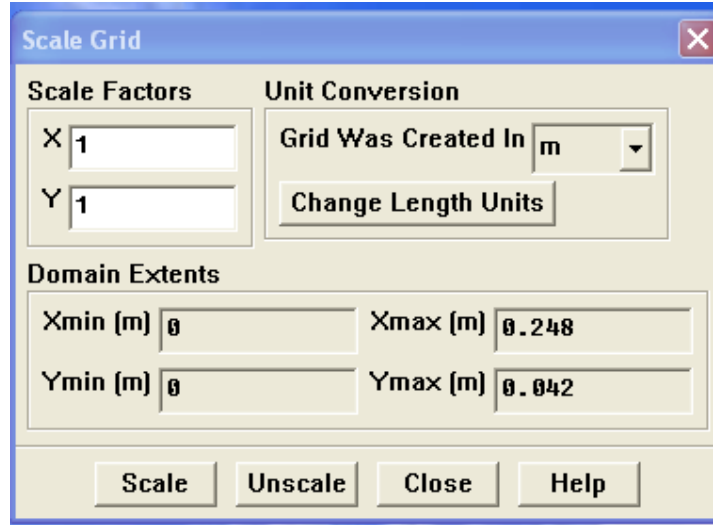
Şekil 3.1 Probleme için tasarlanan çözüm ağında kullanılan sınır şartları ve koordinatlar



Şekil 3.2 Probleme ait duvar yaklaşım modelli çözüm ağı

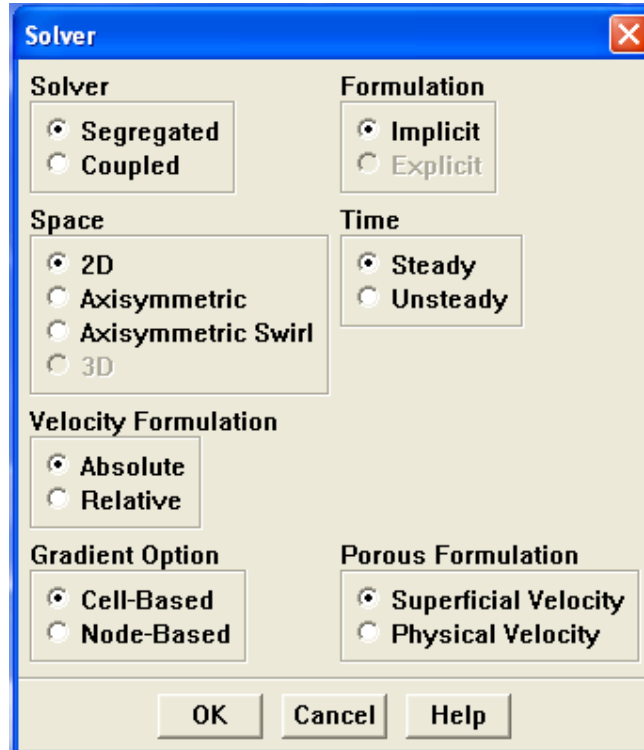
### 3.1.3. Çözüm Algoritması

- 1) Gambitte çizilen model export komutu ile Fluent e aktarıldı.
- 2) Fluent programı 2D olarak çalıştırılarak ve File-Read -Case komutu kullanılarak msh dosyası okutuldu.
- 3) Grid-Check komutu ile çizilen modelin geometrik kontrolü yapıldı.
- 4) Grid-Scale komutu ile Gambit te mm olarak çizilen grid m' ye çevrildi.



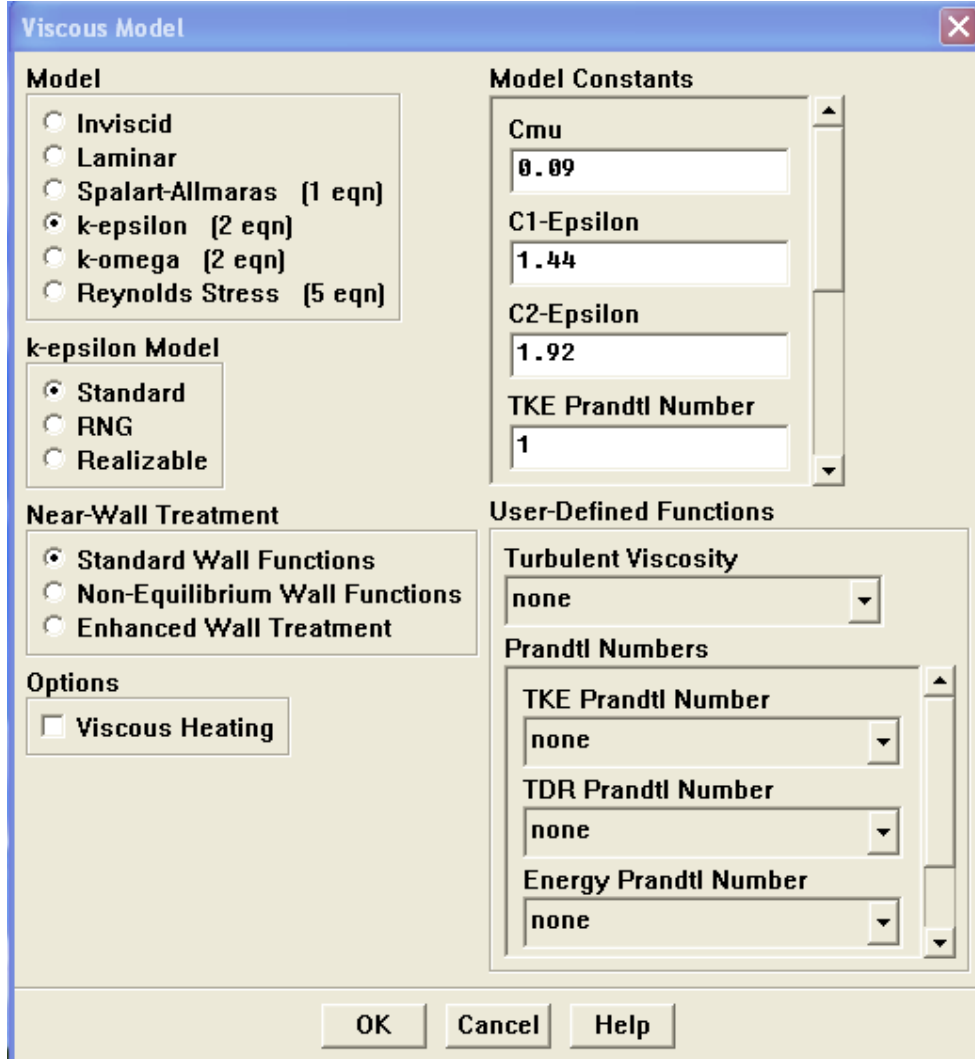
Şekil 3.3 Grid-Scale komutu

5) Define-Models-Solver komutu ile Segregated-Implicit-2D çözüm yöntemi seçildi.



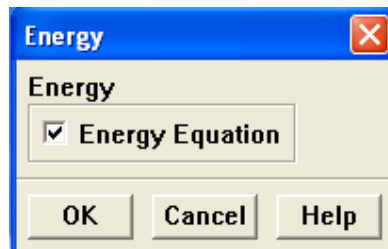
Şekil 3.4 Çözücü ayarlarının yapılması

6) Define-Models-Viscous komutu ile k-epsilon modeli seçildi. K-epsilon modeli diğer modellere göre bu problem için daha iyi sonuç verdi.



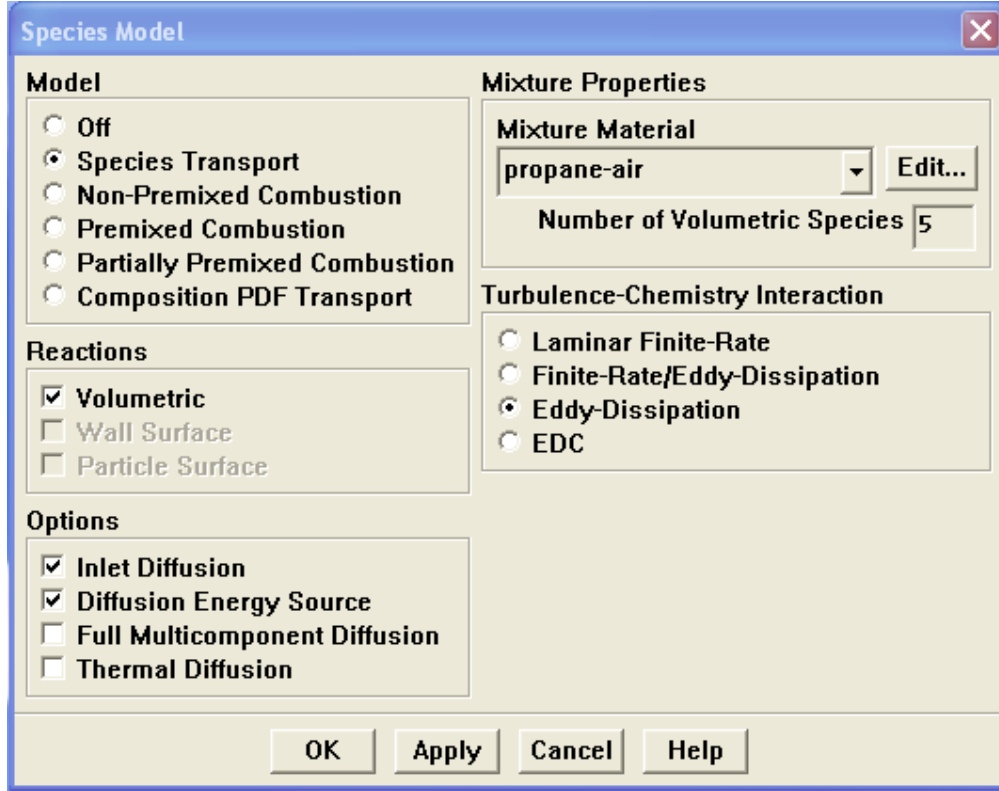
Şekil 3.5 Viskozite model ayarlamaları

7) Define-Models-Energy komutu ile aktif hale getirilerek enerji korunum denklemlerinin nümerik çözülmesi sağlandı.



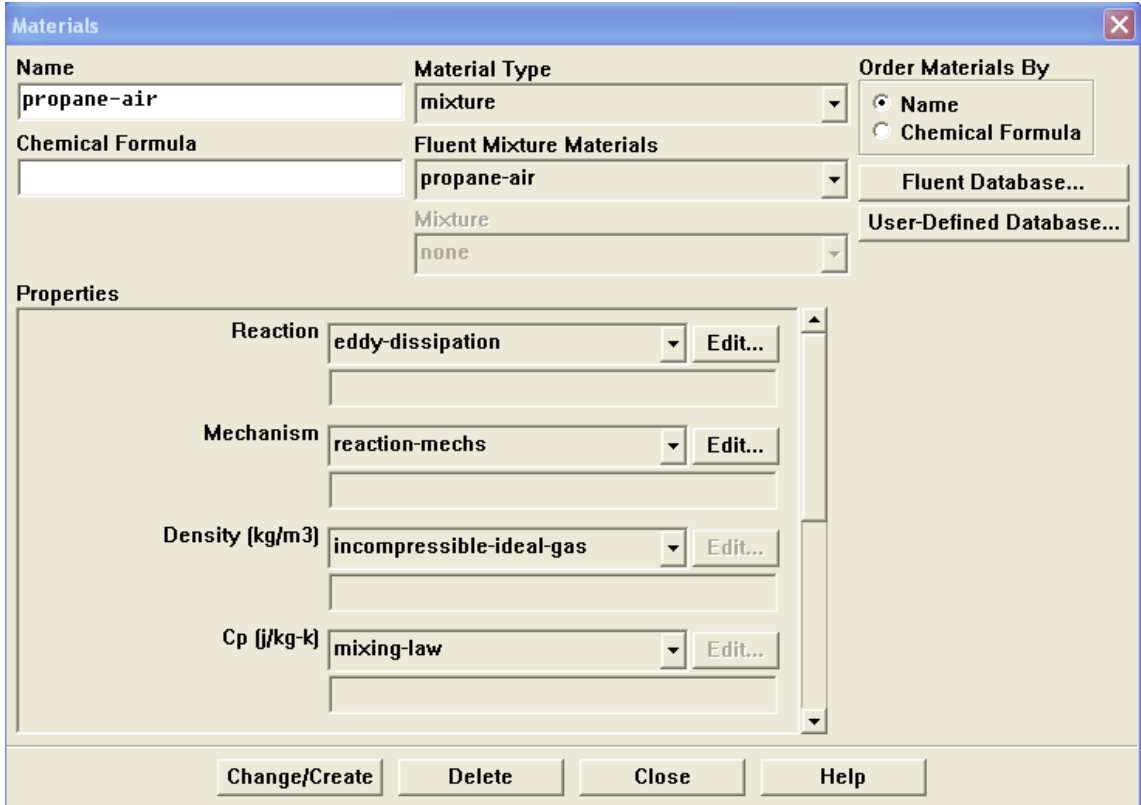
Şekil 3.6 Enerji denklemlerinin aktifleştirilmesi

8) Define-Models-Species komutu ile model olarak Species transport seçildi. Reaksiyon bölümünde volumetric işaretlendi. Karışım material listesinden de propan-air seçildi. Türbülans-kimyasal reaksiyon bölümünde de Eddy-Dissipation seçildi.



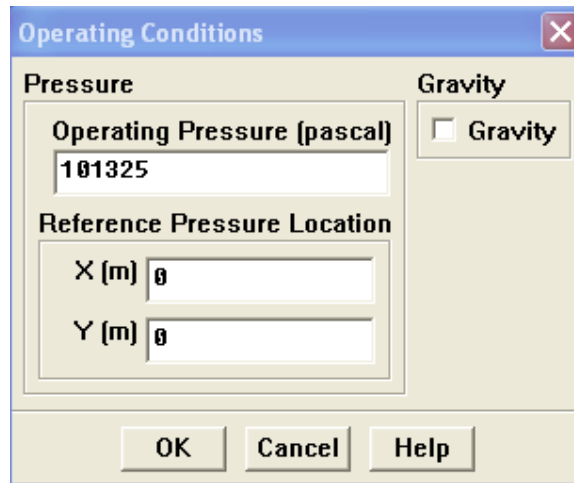
Şekil 3.7 Reaksiyon model ayarlamaları

9) Define-Materials komutu ile propan-hava karışımının termo-fiziksel özellikleri girildi. Isıl kapasite için mixing law seçeneği seçildi. Diğer özellikler sabit kabul edildi.



Şekil 3.8 Karışımın termofiziksel özellikleri

10) Define-Operating Conditions komutu ile çevre şartları girildi.



Şekil 3.9 Çevre şartları

11) Define-Boundary Conditions komutu yardımıyla sınır şartları girildi. Hava ve yakıt için belirtilen Velocity-Inlet sınır şartları için sıcaklık ve hız değerleri ve reaksiyon girdilerinin

oranları girildi. Duvar sınır şartı için duvar adyabatik olarak kabul edildi ve heat flux seçeneği seçildi. Son olarak çıkış sınır şartı olarak outflow değerler girildi.

**Velocity Inlet**

Zone Name  
air\_inlet

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 16.7 constant

Temperature (k): 300 constant

Turbulence Specification Method: Intensity and Hydraulic Diameter

Turbulence Intensity (%): 10

Hydraulic Diameter (m): 0.07

Species Mass Fractions

c3h8	0	constant
o2	0.23	constant
co2	0	constant
h2o	0	constant

OK Cancel Help

Şekil 3.10 Hava için hız giriş şartı

**Velocity Inlet** ✖

Zone Name  
fuel\_inlet

Velocity Specification Method **Magnitude, Normal to Boundary** ▾

Reference Frame **Absolute** ▾

Velocity Magnitude (m/s)  constant ▾

Temperature (k)  constant ▾

Turbulence Specification Method **Intensity and Hydraulic Diameter** ▾

Turbulence Intensity (%)

Hydraulic Diameter (m)

**Species Mass Fractions**

c3h8	<input type="text" value="1"/>	constant ▾
o2	<input type="text" value="0"/>	constant ▾
co2	<input type="text" value="0"/>	constant ▾
h2o	<input type="text" value="0"/>	constant ▾

OK Cancel Help

Şekil 3.11 Yakıt için hız giriş şartı

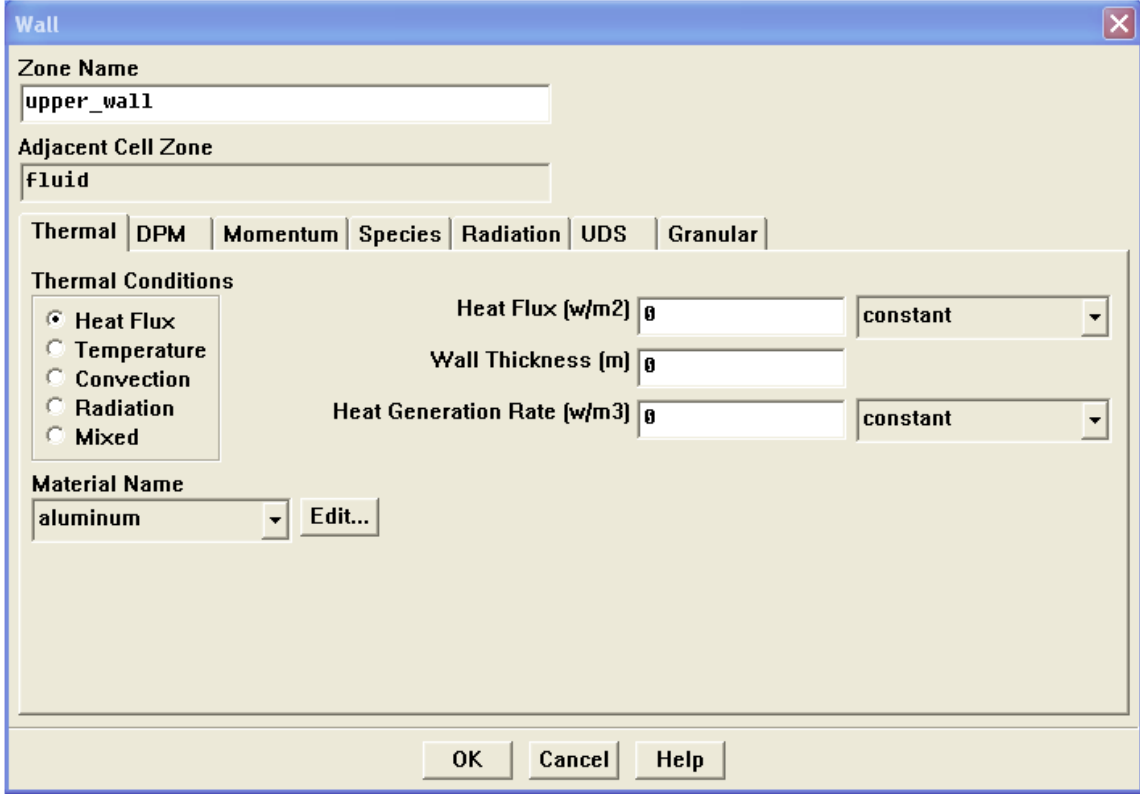
**Outflow** ✖

Zone Name  
outflow

Flow Rate Weighting

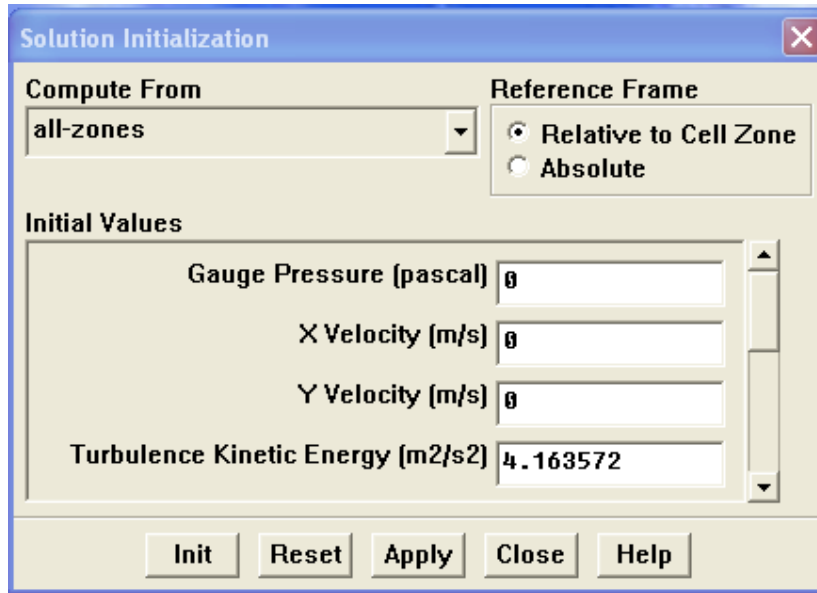
OK Cancel Help

Şekil 3.12 Çıkış için outflow sınır şartı



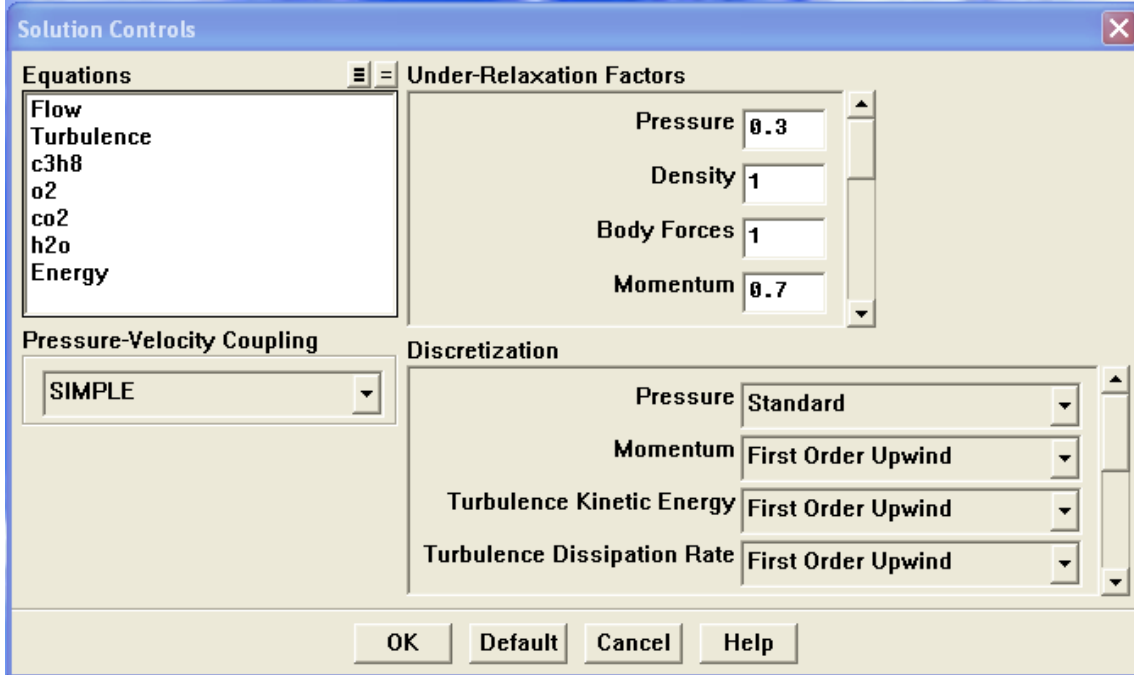
Şekil 3.13 Duvarlar için duvar sınır şartı

12) Solve-Initialize-Initialize komutu yardımıyla hesaplama All zones seçilerek başlatıldı.



Şekil 3.14 Başlangıç değerlerinin atanması

13) Solve-Control-Solution komutu ile Under-Relaxation Factors değerleri reaksiyon turleri için 0.9 a düşürüldü. Ayrıklaştırma yöntemlerinden basınç Standart, diğerleri First Order Upwind seçildi. Nümerik çözümlemede basınç- hız arasındaki bağintıyı çözebilmek için Simple metodu tercih edildi.



şekil 3.15 çözüm kontrol parametreleri

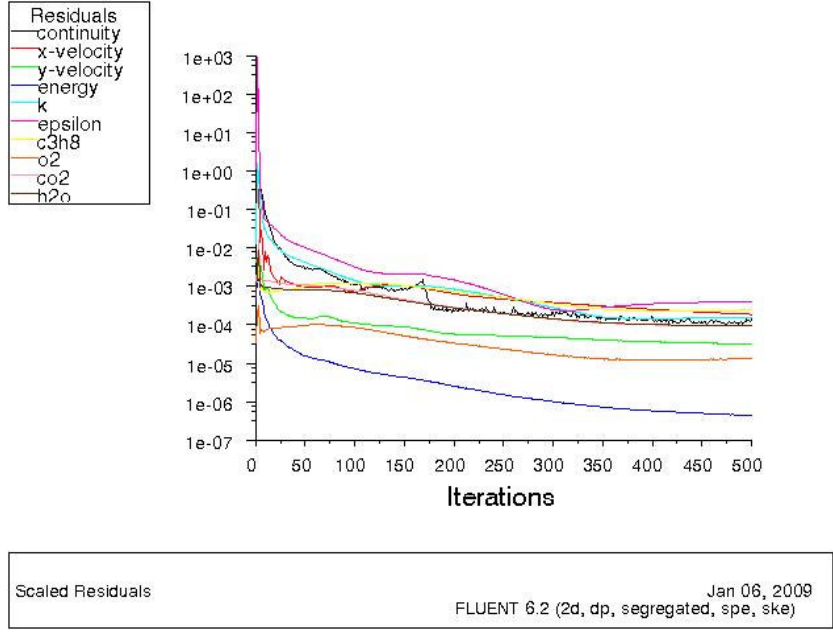
14) Solve-Monitors-Residuals komutu yardımı ile yakınsama ve yazım çizim ayarları yapıldı. Yakınsama değeri enerji için 1e-06 diğer tercihler için 1e-03 olarak seçildi. Yakınsama kriterlerinin sağlanıp sağlanmadığını grafiksel olarak görmek için plot opsiyonu aktif hale getirildi.

14) Solve-Iterate komutundan iterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatıldı.

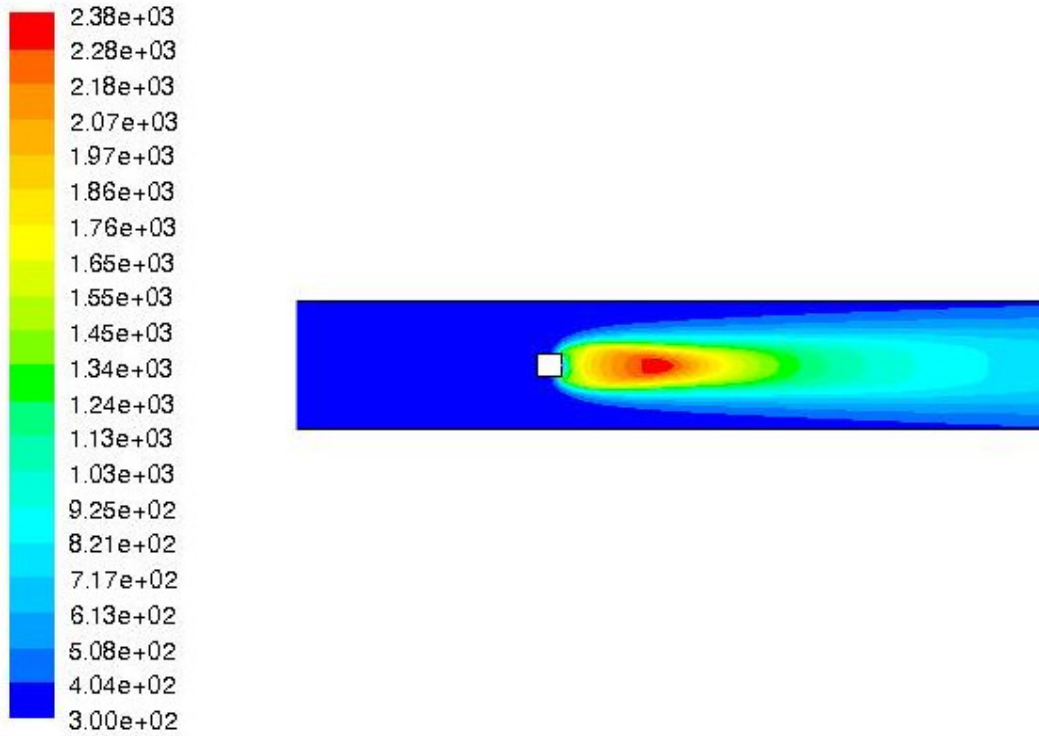
15) Ayarlanan yakınsama değerlerine ulaşıldığında özüm File-Write-Case and Data komutu yardımıyla kaydedilir.

### 3.1.4. Çözüm Sonuçları

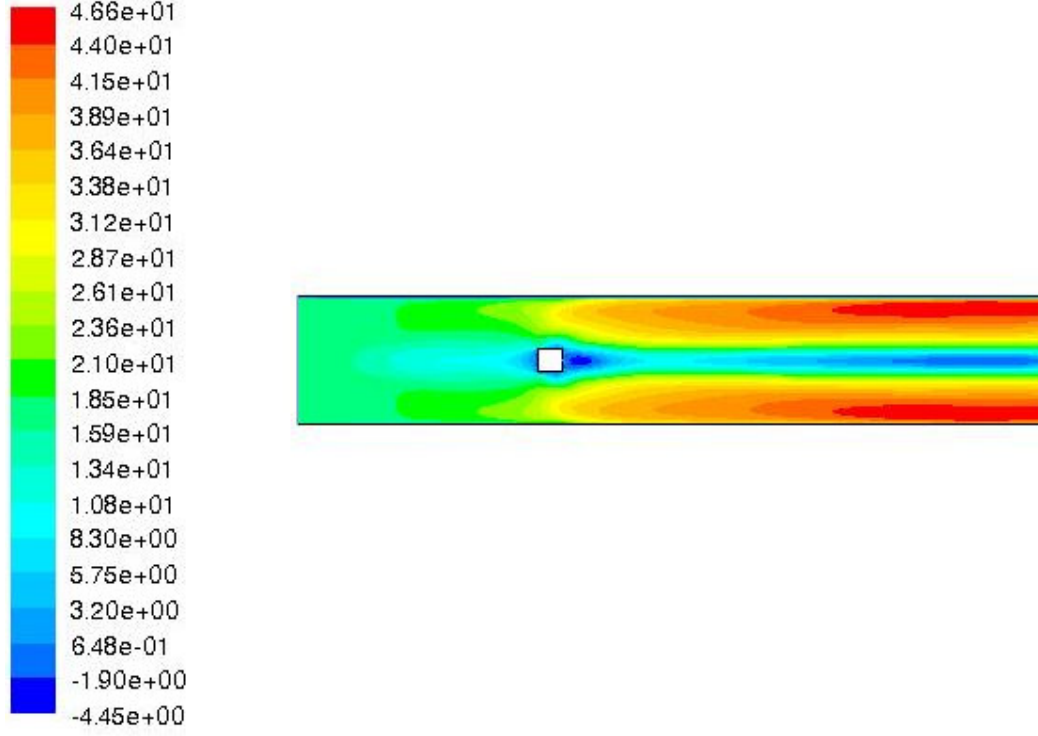
Yeterli yakınsama değerine ulaşmış çözümlerde istenen değişkenlere göre grafik çizdirebilmek için XY plot komutu kullanılmıştır. Sınır şartları dışında çözüm alanı içerisinde belli koordinatlarda veya sabit doğrularda görmek istediğimiz sonuçlar için Surface-Line/Rake komutu kullanılmıştır. Dört farklı X/D değeri için FAVR=0.631 ve bizim aynı hava yakıt oranına göre belirlediğimiz FAVR oranı için sıcaklık eğrileri çizilmiştir. Kendi geometrimize göre bulduğumuz FAVR=0.42 oranına ait grafiklerde alev uzunluğunun FAVR=0.631'e göre daha küçük olduğu görülmektedir. Bundan dolayı her iki FAVR oranında farklı X/D oranlarında maksimum hıza ulaşılmıştır. FAVR=0.42 için maksimum sıcaklığa X/D=3 noktasında ulaşılırken FAVR=0.631 için X/D=6 noktasında ulaşılmaktadır. Sıcaklık genel olarak nozülün tam ortasında maksimum değerine ulaşırken duvarlara yaklaştıkça düşmektedir. Ayrıca farklı FAVR oranlarına sahip B ve C alevleri içinde alev uzunluğunun her iki durumda da FAVR oranı düştükçe azaldığı net bir şekilde gözükmektedir. Deneyde elde edilen sıcaklık dağılımı ile karşılaştırıldığında ulaşılan maksimum sıcaklığın belirgin bir şekilde daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum geometrideki farklılıklar ve yapılan kabullerden kaynaklanmaktadır. Hızlar için durum sıcaklık profilinin tam tersi bir durum söz konusudur. Nozülden duvarlara doğru yaklaştıkça sıcaklığın tam aksine hızlar artmaktadır. Aşağıda 3 değişik FAVR oranına ait alevler için sıcaklık ve hız kontürleri ayrıca sıcaklık eğrileri bulunmaktadır.



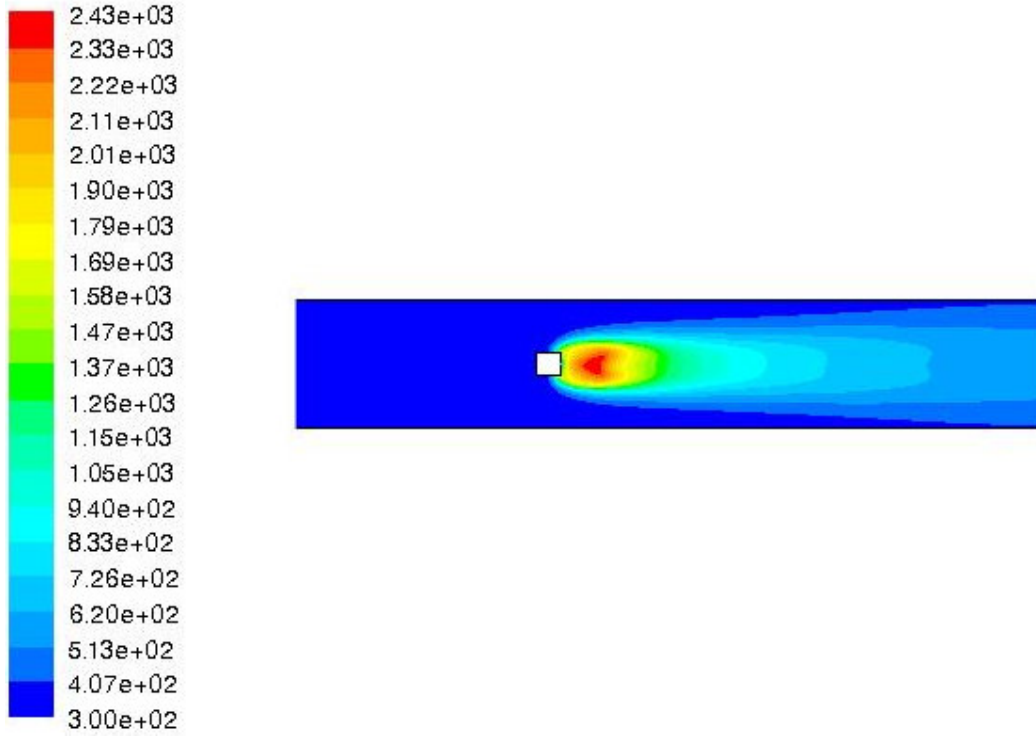
Şekil 3.16 Problem1 Alev A için yakınsama eğrileri



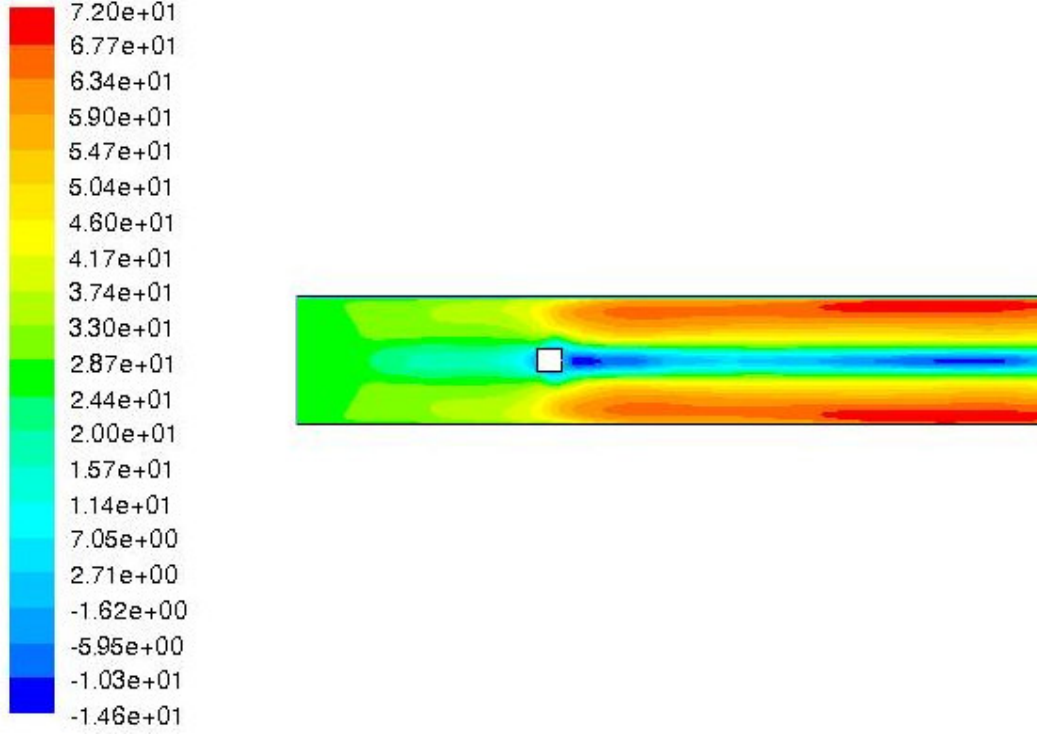
Şekil 3.17 Alev A (FAVR=0.46) için sıcaklık profili



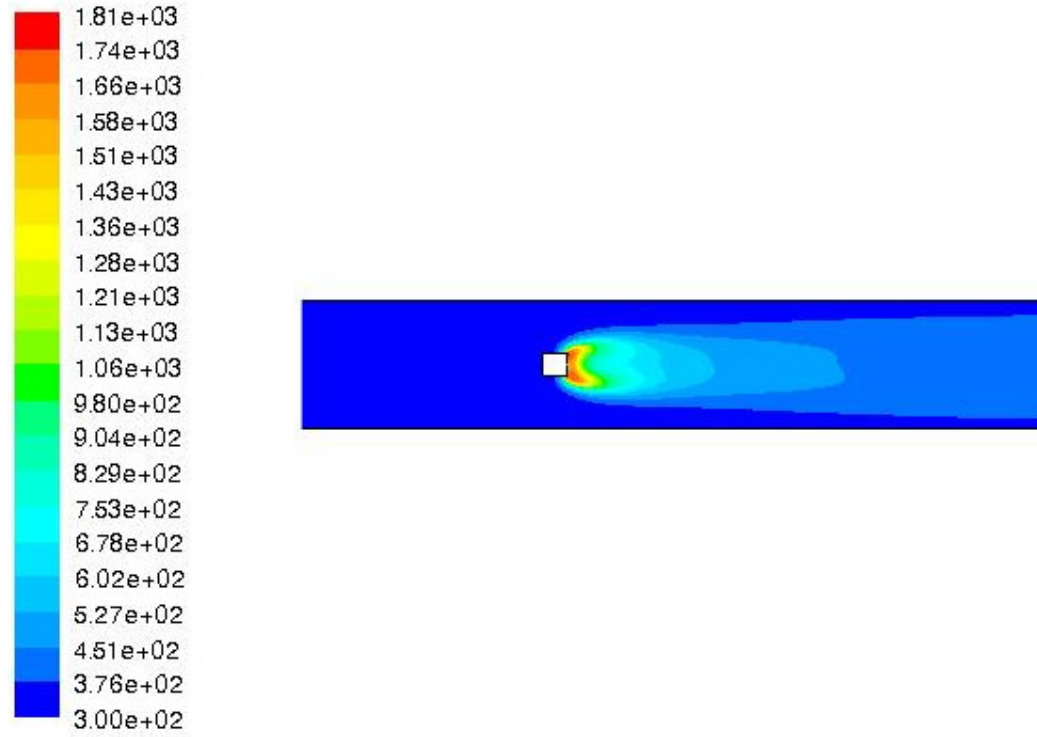
Şekil 3.18 Alev A (FAVR=0.46) için hız profili



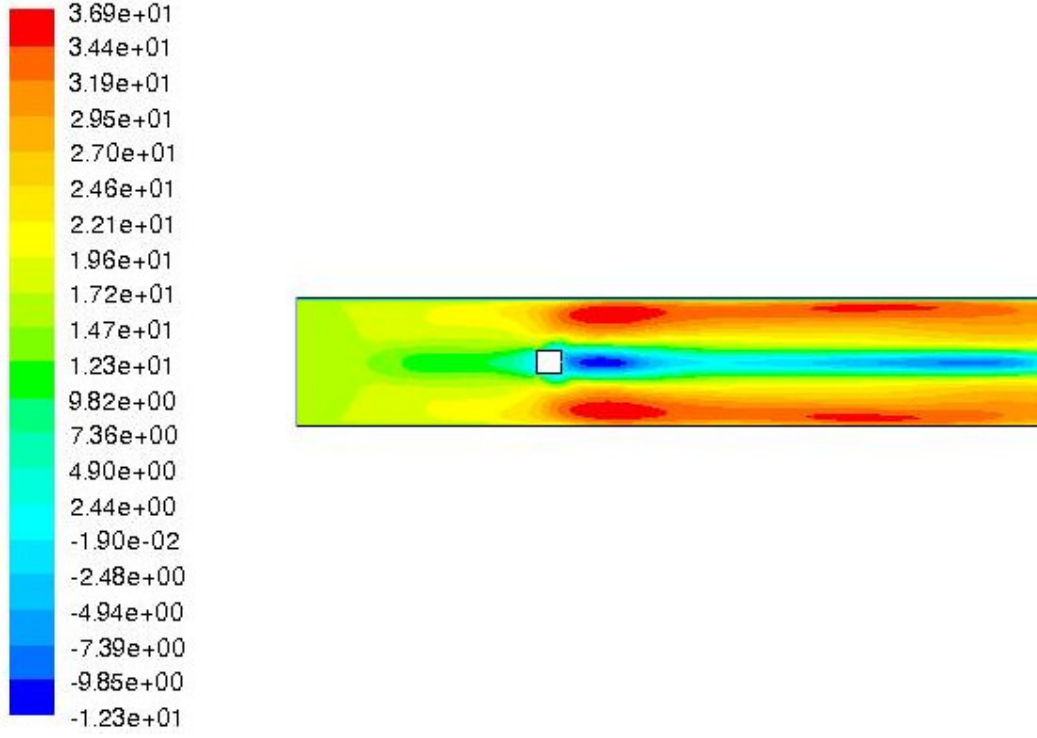
Şekil 3.19 Alev B (FAVR=0.27) için sıcaklık profili



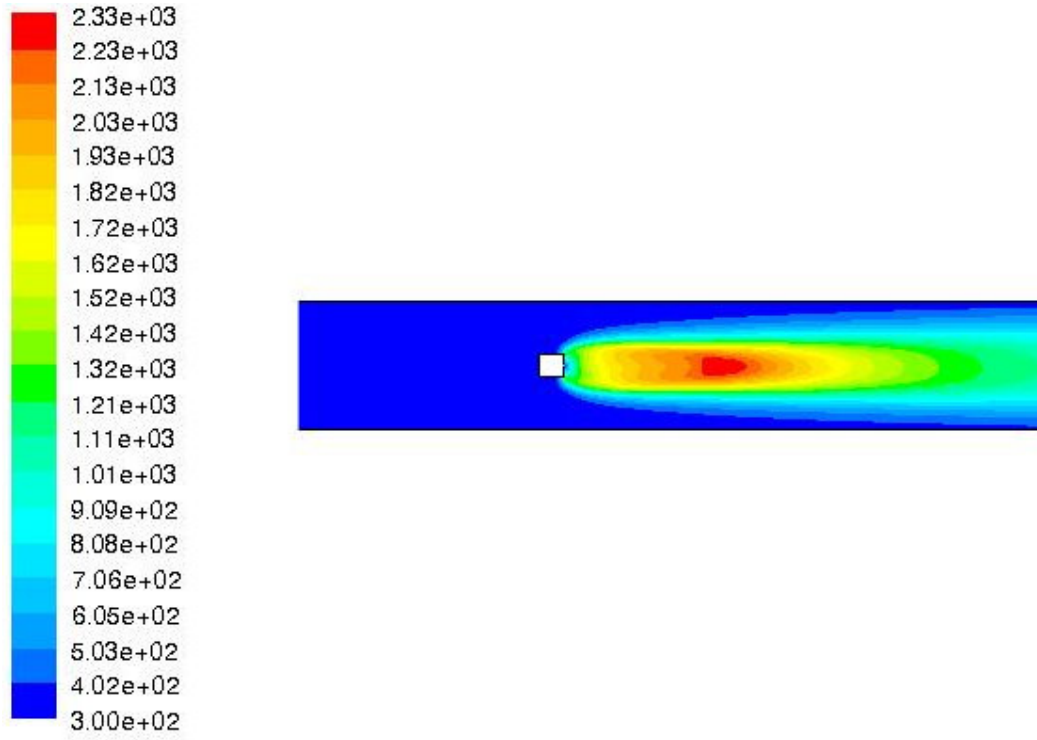
Şekil 3.20 Alev B (FAVR=0.27) için hız profili



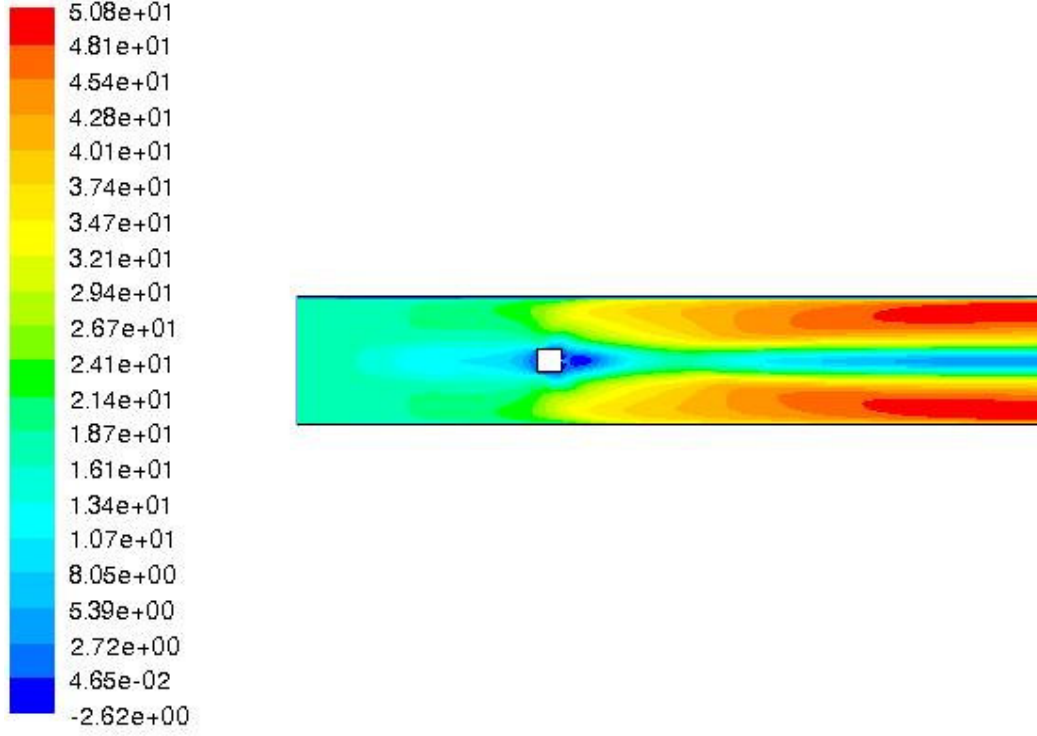
Şekil 3.21 Alev C (FAVR=0.14) için sıcaklık profili



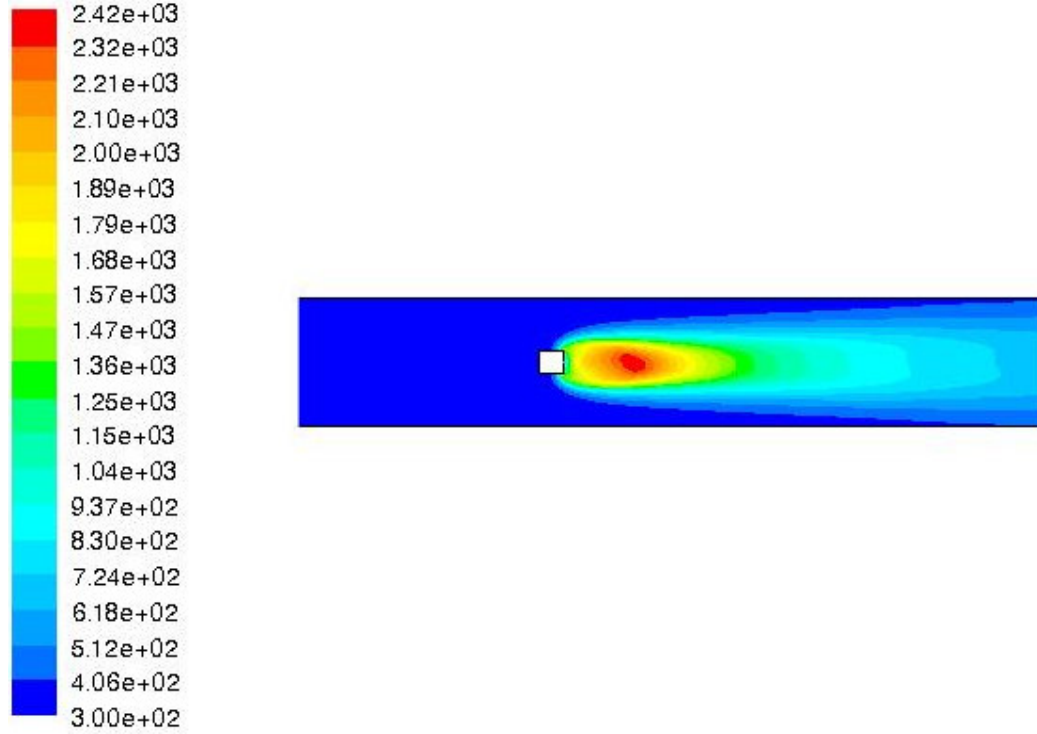
Şekil 3.22 Alev C (FAVR=0.14) için hız profili



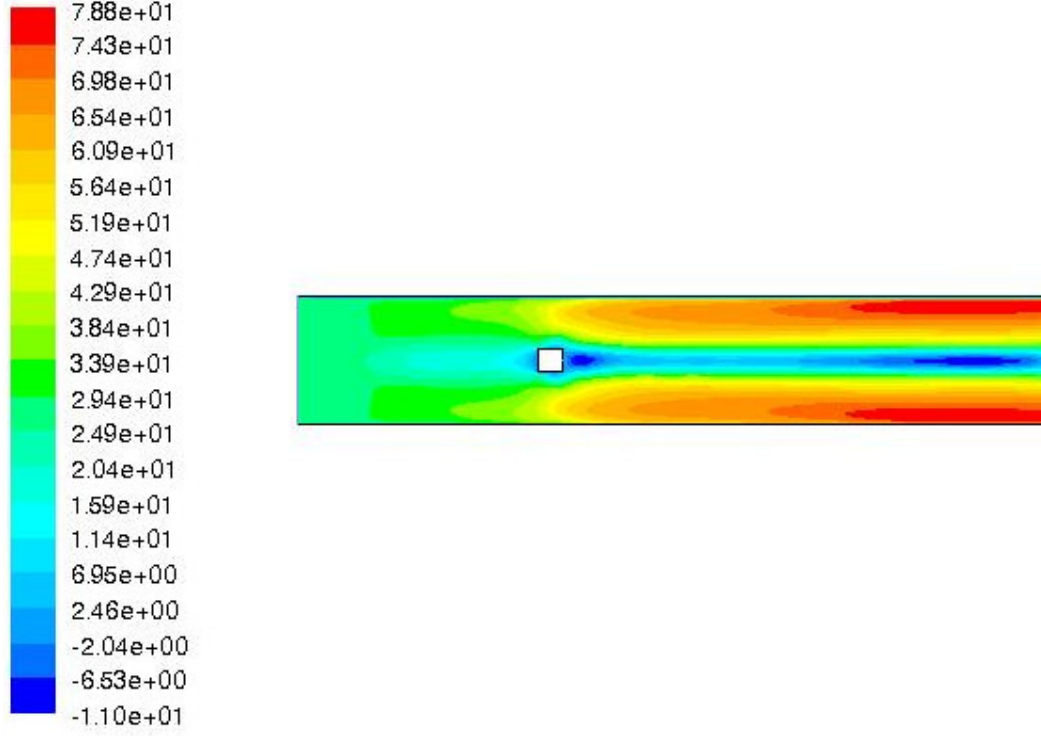
Şekil 3.23 Alev A (FAVR=0.631) için sıcaklık profili



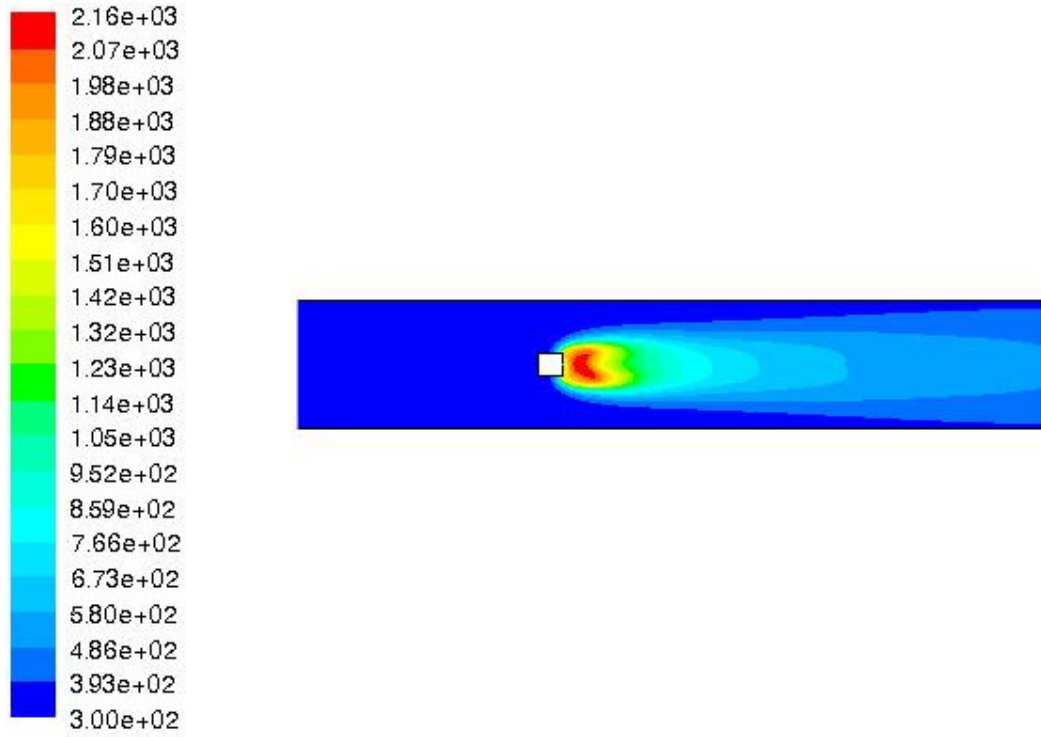
Şekil 3.24 Alev A (FAVR=0.631) için hız profili



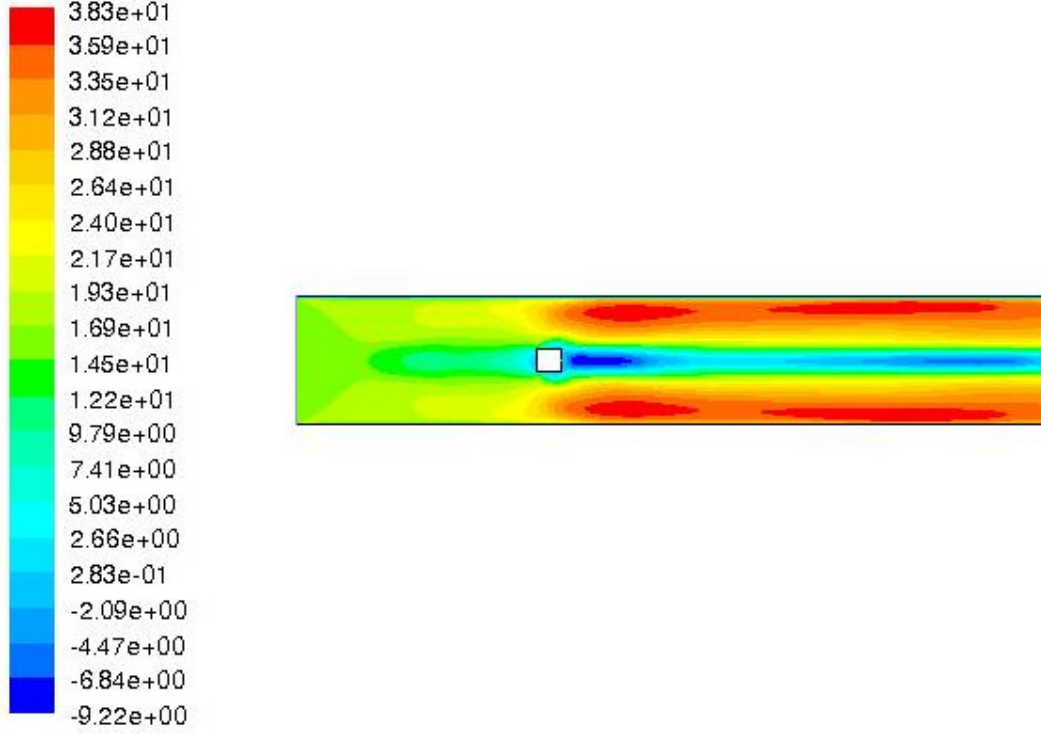
Şekil 3.25 Alev B (FAVR=0.375) için sıcaklık profili



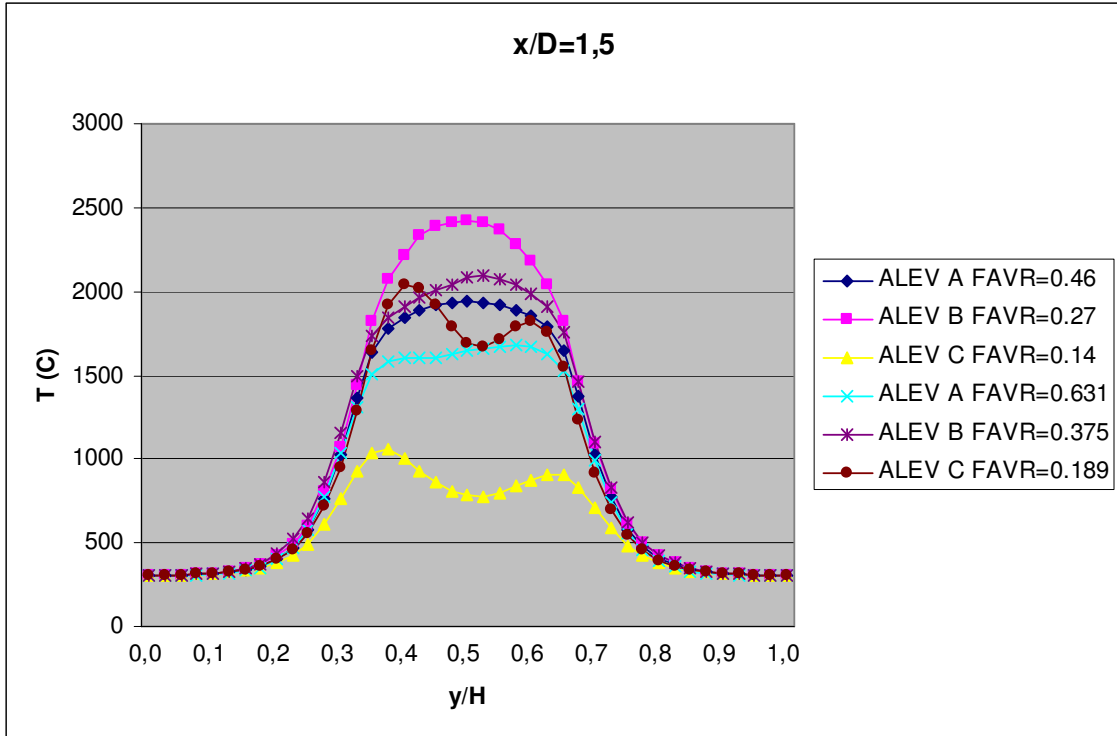
Şekil 3.26 Alev B (FAVR=0.375) için hız profili



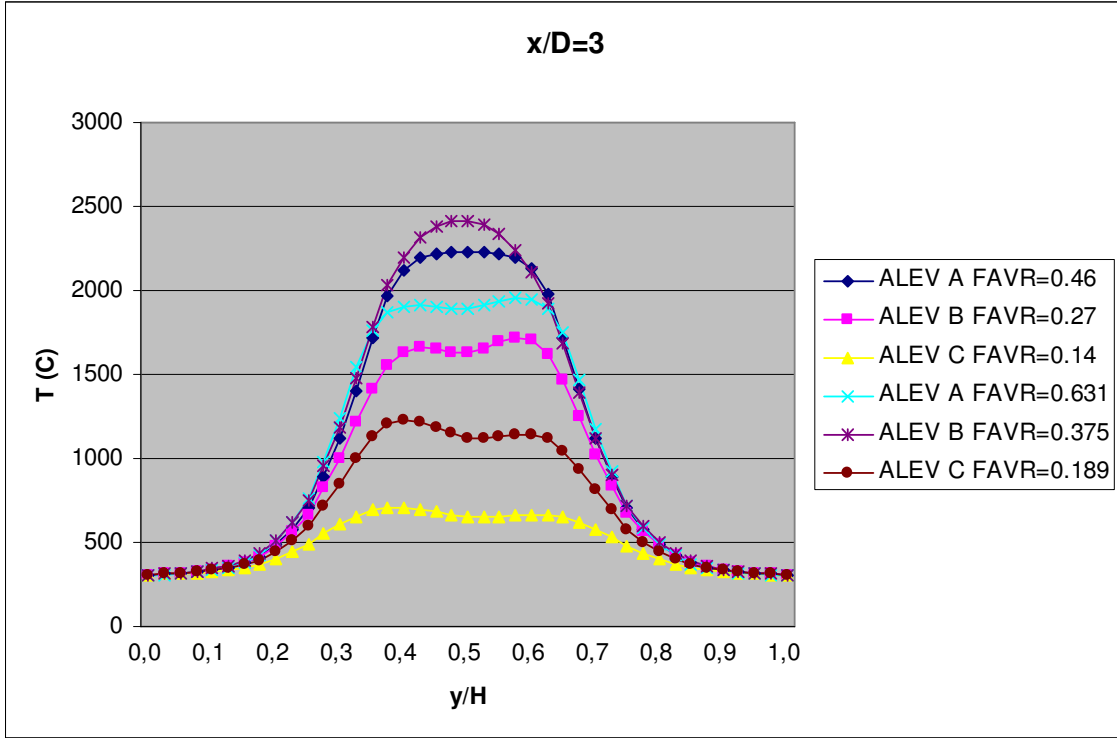
Şekil 3.27 Alev C (FAVR=0.189) için sıcaklık profili



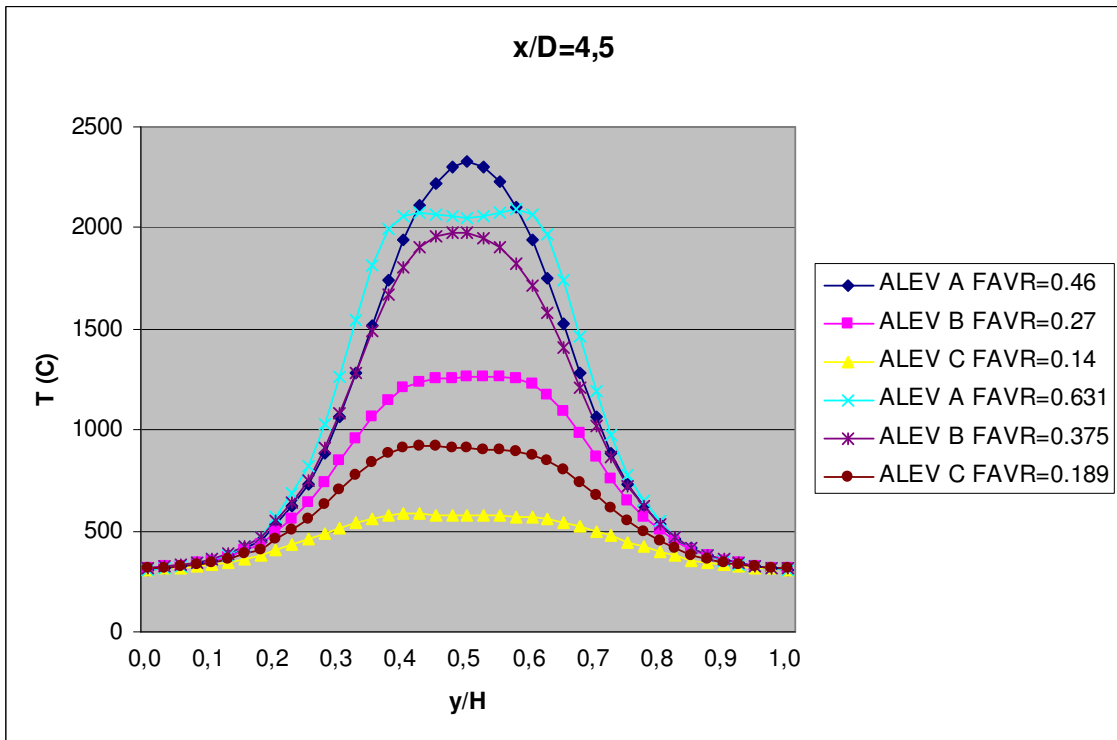
Şekil 3.28 Alev C (FAVR=0.189) için hız profili



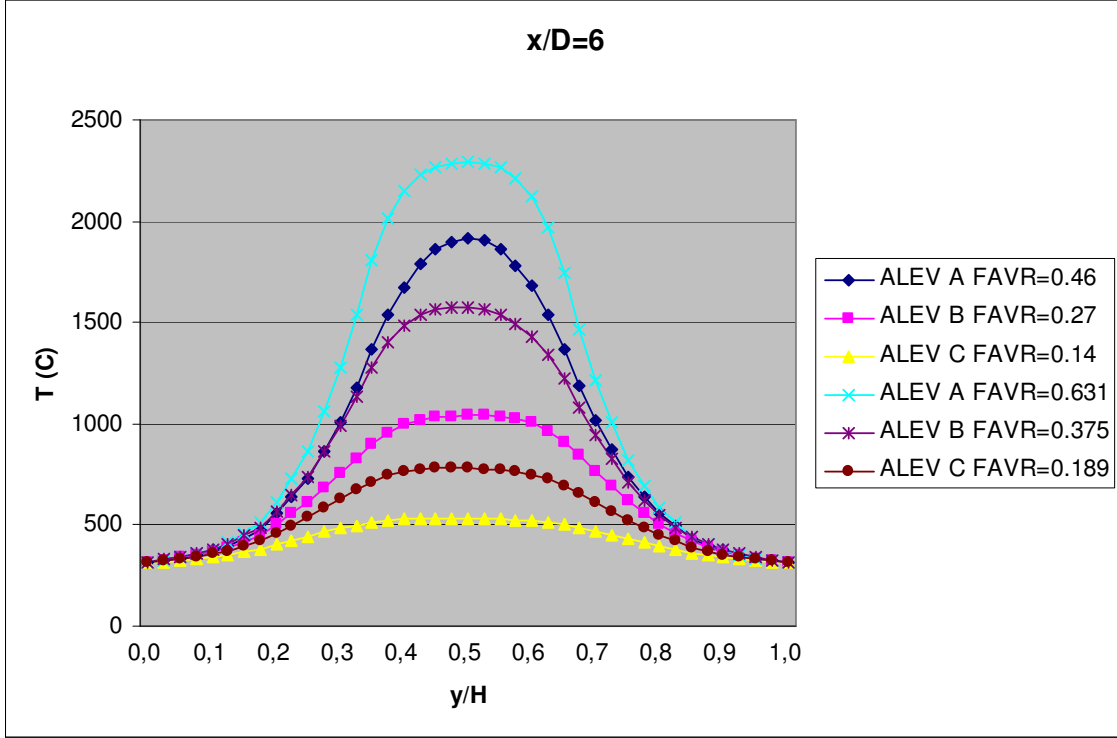
Şekil 3.29  $X/D=1.5$  için sıcaklık profilleri



Şekil 3.30 X/D=3 için sıcaklık profilleri



Şekil 3.31 X/D=4.5 için sıcaklık profilleri



Şekil 3.32  $X/D=6$  için sıcaklık profilleri

### 3.2 İzotermal Durum ( Problem 2 )

#### 3.2.1 Problemin açıklanması

Ele alınan 2 boyutlu brülör şekil 3.1 deki (Problem 1) ile aynıdır. Yakıcının ortasında bulunan silindirik nozulden Tablo 3.1 de verilen hızlarla yakıt yerine yine hava enjekte edilmektedir. Hava yakıcıya yine Tablo 3.1 de verilen hızlarla eşksenli olarak girmektedir. Deneyde hava jeti silindirik nozulden birbirine yakın 125 delikten enjekte edilmiştir. Problem çözülürken yakıtın 0,2 mm yükseklikteki 0,155 m uzunluğundaki nozulden enjekte edildiği varsayılmıştır. Buna göre deneyde verilen hava debisi ve hava jeti debisine göre yeni hava jeti hızı hesaplanmıştır. Deneyle problemde ele alınan veriler karşılaştırıldığında hava-hava jeti oranı (FAR) aynı alınmış fakat ele alınan modeldeki farklılıktan dolayı hava-hava jeti hızı oranı (FAVR) farklılık göstermiştir. Daha sonra deneyde kullanılan hava-hava jeti hızı oranlarına göre problem tekrar çözülmüş ve yanmanında olduğu durum göz önünde bulundurularak hız ve türbülans kinetiği ile ilgili karşılaştırmalar yapılmıştır.

#### 3.2.2. Çözüm Algoritması

- 1) Gambitte çizilen model export komutu ile Fluent e aktarıldı.
- 2) Fluent programı 2D olarak çalıştırılarak File-Read –Case komutu kullanılarak msh dosyası okutuldu.
- 3) Grid-Check komutu ile çizilen modelin geometrik kontrolü yapıldı.
- 4) Grid-Scale komutu ile Gambit te mm olarak çizilen grid m ye çevrildi.
- 5) Define-Models-Solver komutu ile Segregated-Implicit-2D çözüm yöntemi seçildi.
- 6) Define-Models-Viscous komutu ile k-epsilon modeli seçildi.
- 7) Define-Models-Energy komutu ile aktif hale getirilerek enerji korunum denklemlerinin nümerik çözümlenmesi sağlandı.
- 8) Define-Materials komutu ile havanın termo-fiziksel özellikleri girildi.
- 9) Define-Operating Conditions komutu ile çevre şartları girildi.
- 10) Define-Boundary Conditions komutu yardımıyla sınır şartları girildi. Hava için belirtilen Velocity-Inlet sınır şartları için sıcaklık ve hız değerleri ve reaksiyon girdilerinin oranları girildi. Duvar sınır şartı için heat flux seçeneği seçildi. Son olarak çıkış sınır şartı olarak outflow değerler girildi.
- 11) Solve-Initialize-Initialize komutu yardımıyla hesaplama All zones seçilerek başlatıldı.
- 12) Solve-Control-Solution komutu ile ayrıklaştırma yöntemlerinden basınç Standart, diğerleri First Order Upwind seçildi. Nümerik çözümlemede basınç-hız arasındaki bağıntıyı çözebilmek için Simple metodu tercih edildi.
- 13) Solve-Monitors-Residuals komutu yardımı ile yakınsama ve yazım çizim ayarları yapıldı. Yakınsama değeri enerji için 1e-06 diğer tercihler için 1e-03 olarak seçildi. Yakınsama

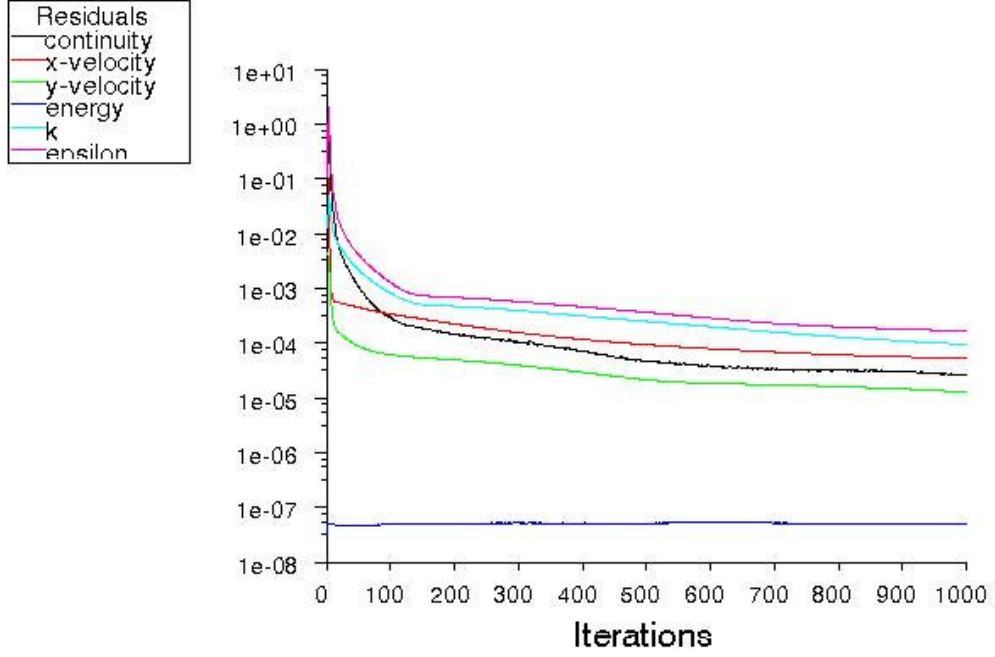
kriterlerinin sağlanıp sağlanmadığını grafiksel olarak görmek için plot opsiyonu aktif hale getirildi.

14) Solve-Iterate komutundan iterasyon sayısı girilerek iterasyon başlatılır.

15) Ayarlanan yakınsama değerlerine ulaşıldığında çözüm File-Write-Case and Data komutu yardımıyla kaydedilir.

### 3.2.3. Çözüm Sonuçları

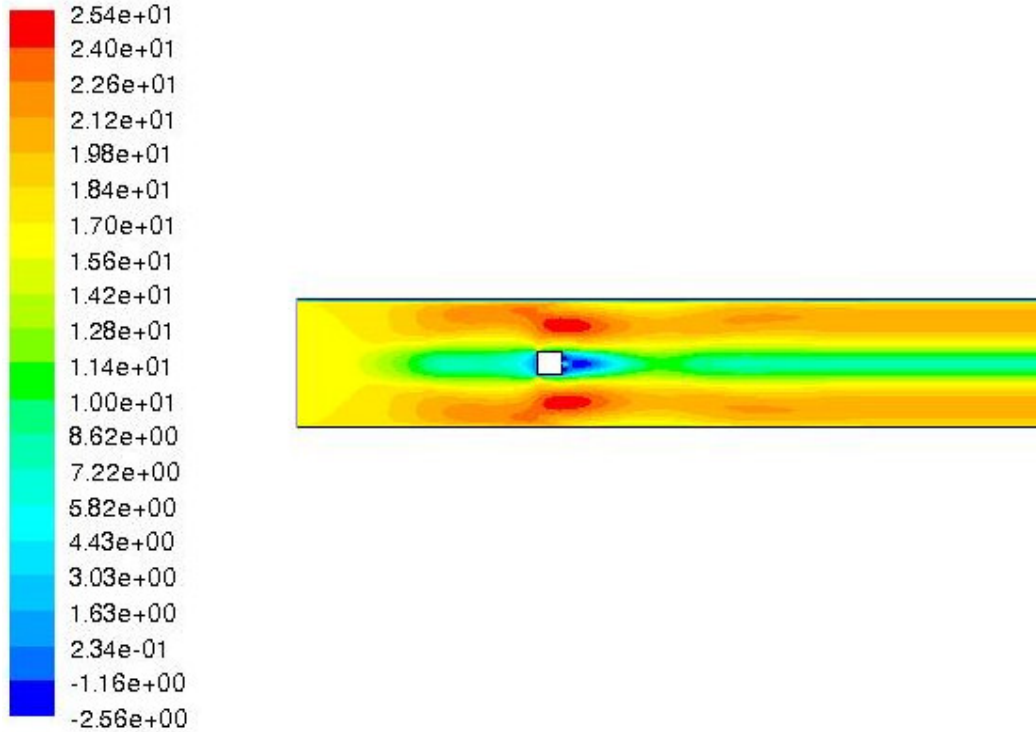
Yeterli yakınsama değerine ulaşmış çözümlerde istenen değişkenlere göre grafik çizdirebilmek için XY plot komutu kullanılmıştır. Sınır şartları dışında çözüm alanı içerisinde belli koordinatlarda veya sabit doğrularda görmek istediğimiz sonuçlar için Surface-Line/Rake komutu kullanılmıştır. Reaksiyonun olduğu durum (Problem 1) ve yanmanın olmadığı durum (Problem 2) için dört farklı X/D değeri için hız ve türbülans kinetik enerji eğrileri çizilmiştir. Yanmanın olduğu durum için FAVR=0.631 ve bizim aynı hava yakıt oranına göre belirlediğimiz FAVR oranı (FAVR=0.46) için eğriler çizilmiştir. İzotermal durum içinde yine aynı hava-hava jeti oranı için bizim geometrimize göre hava jeti hızı (IR=0.73) hesaplanmıştır. İkinci olarak da deneyde kullanılan hava-hava jeti oranı (IR=0.53) aynen kullanılmış ve buna göre eğriler çizdirilmiştir. Bu dört duruma ait eğriler deneyde elde edilen değerlerle excelde aynı grafiğe taşınarak karşılaştırılmıştır.



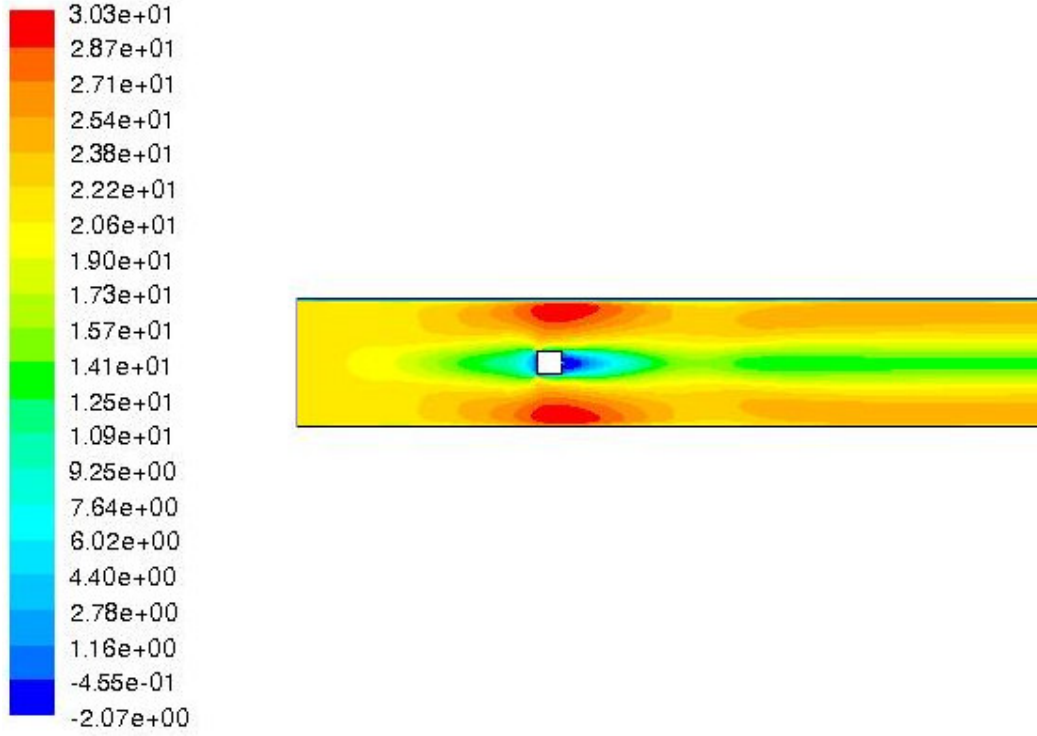
Scaled Residuals

Jan 06, 2009  
FLUENT 6.2 (2d, dp, segregated, ske)

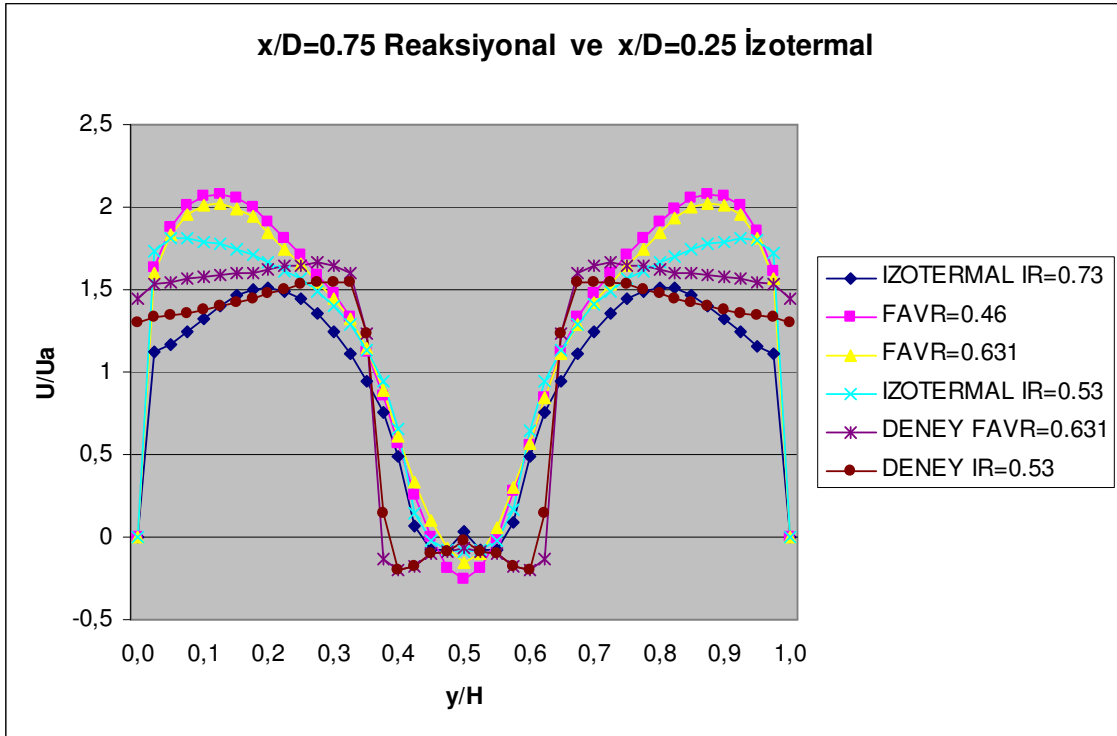
Şekil 3.33 Problem 2 Akım A (IR= 0.53) için yakınsama eğrileri



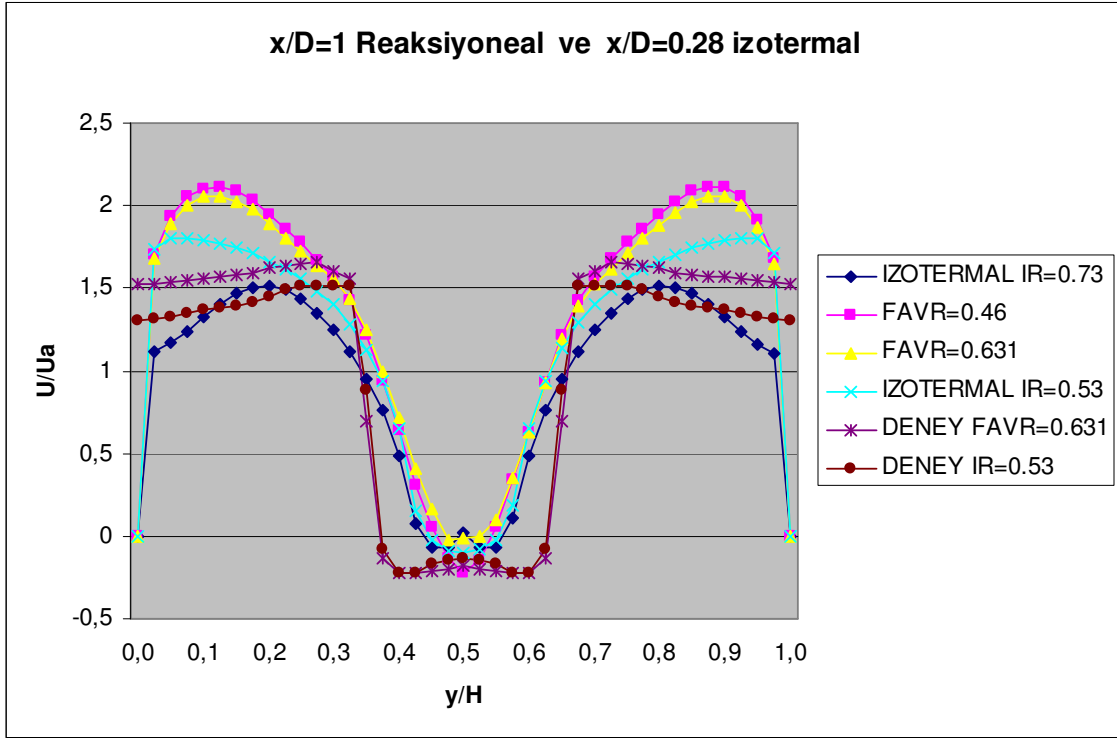
Şekil 3.34 Akım A (Izotermal) IR=0.73 için hız profili



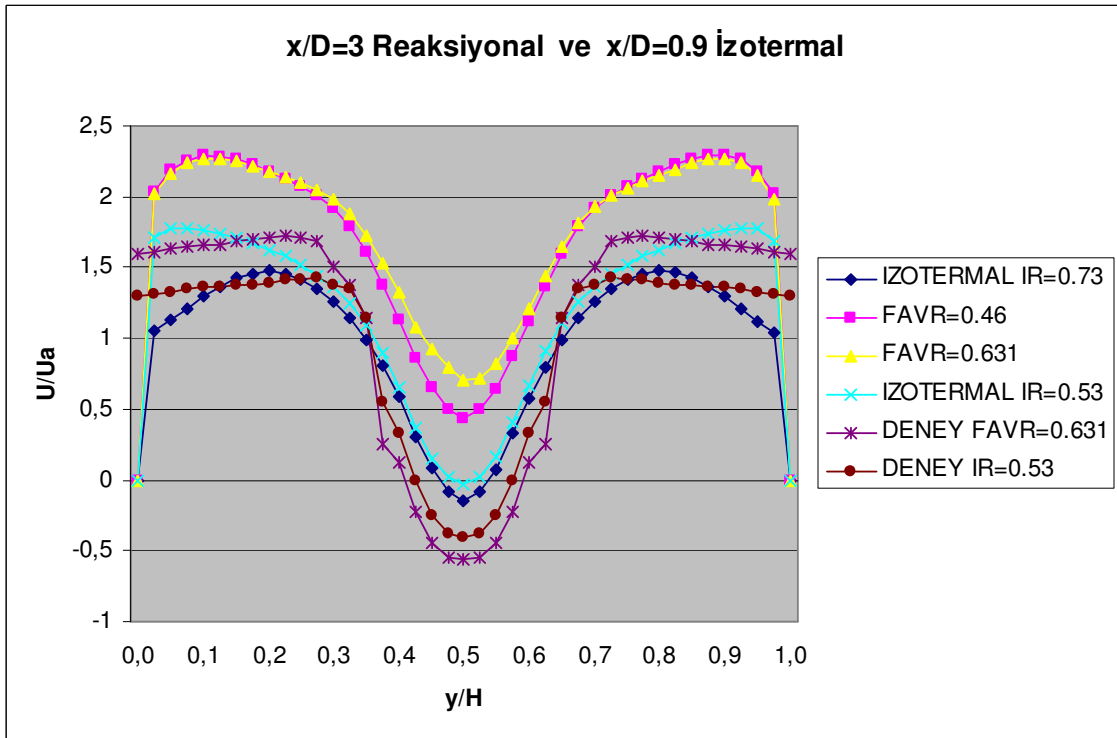
Şekil 3.35 Akım A (İzotermal) IR=0.53 için hız profili



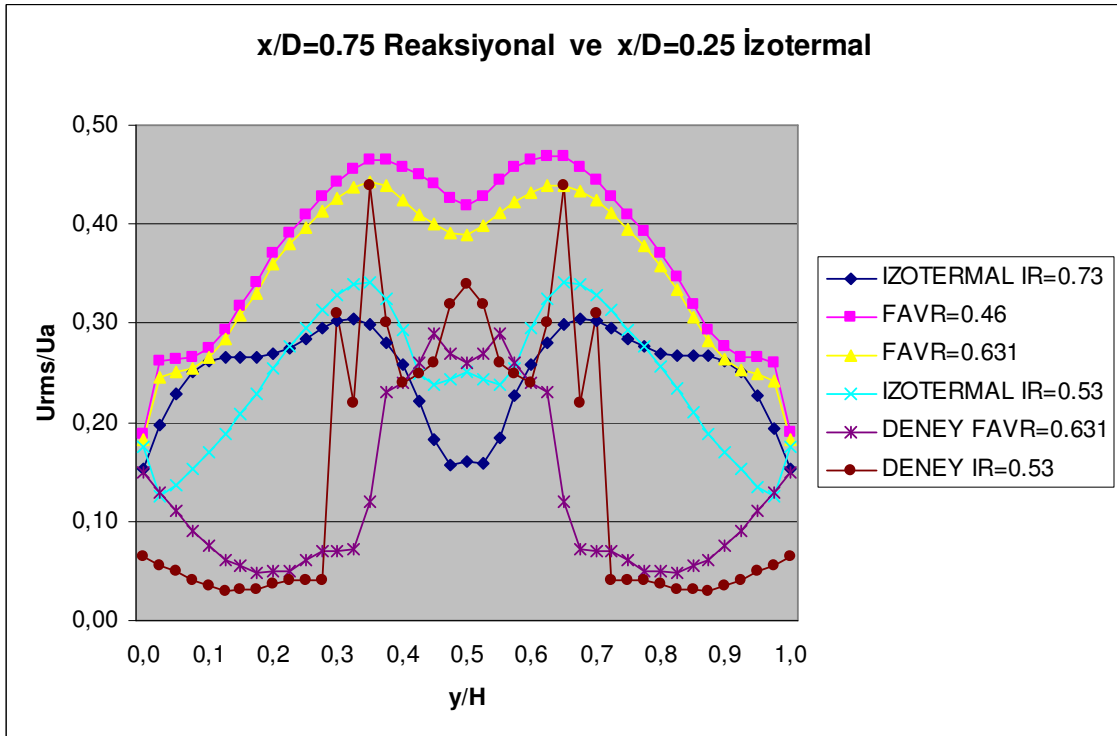
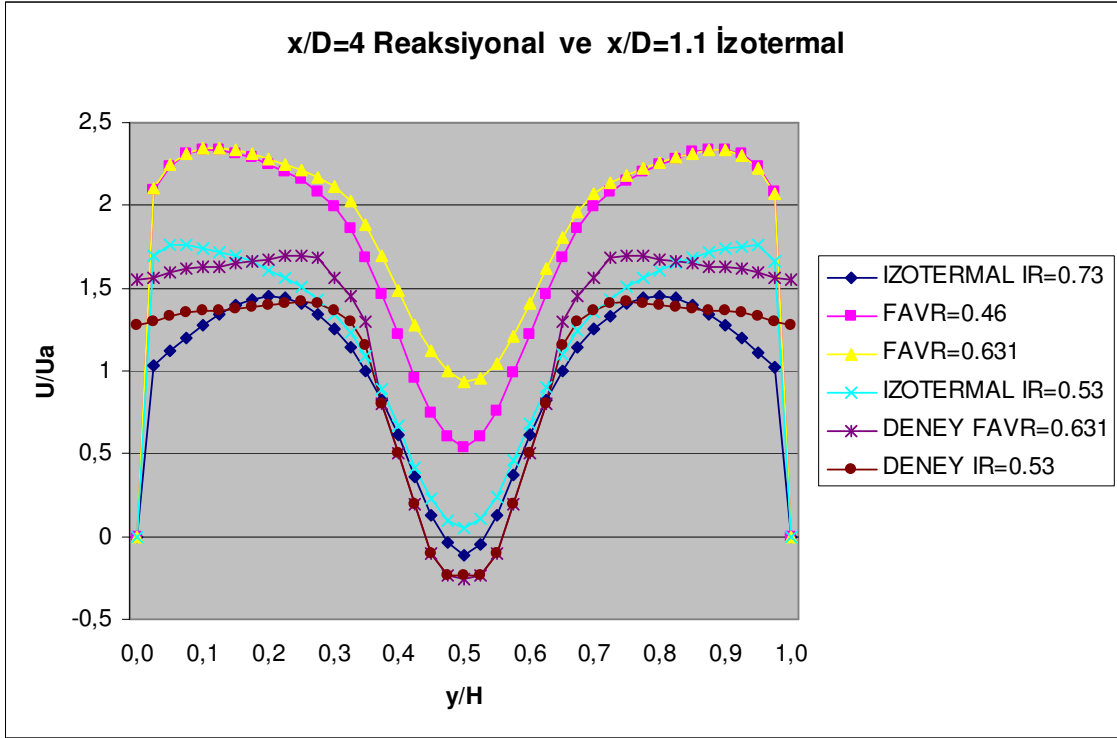
Şekil 3.36 Akım A X/D=0.75 ve X/D=0.25 için hız profilleri

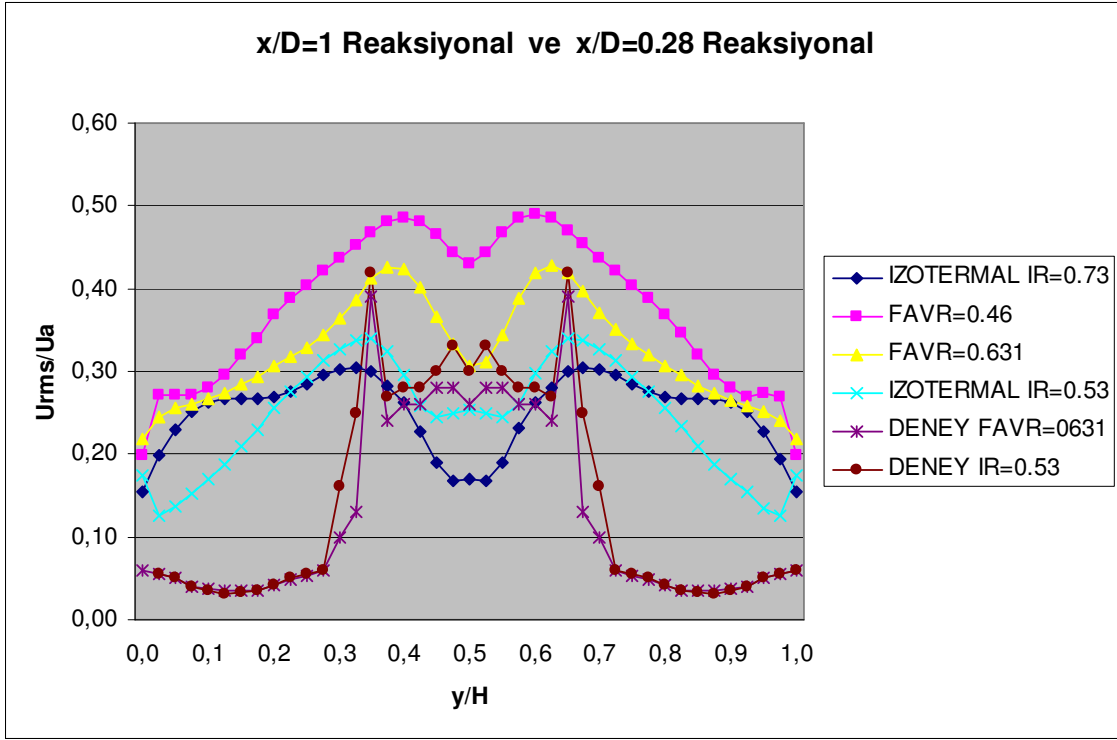


Şekil 3.37 Akım A X/D=1 ve X/D=0.28 için hız profilleri

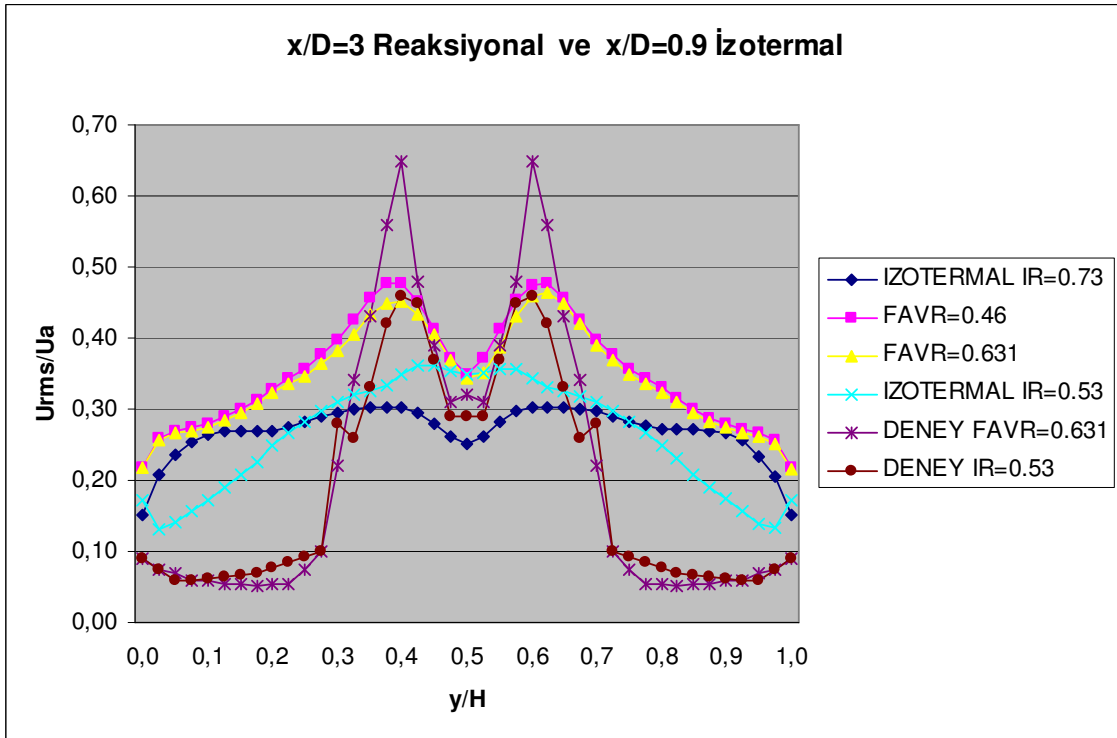


Şekil 3.38 Akım A X/D=3 ve X/D=0.9 için hız profilleri

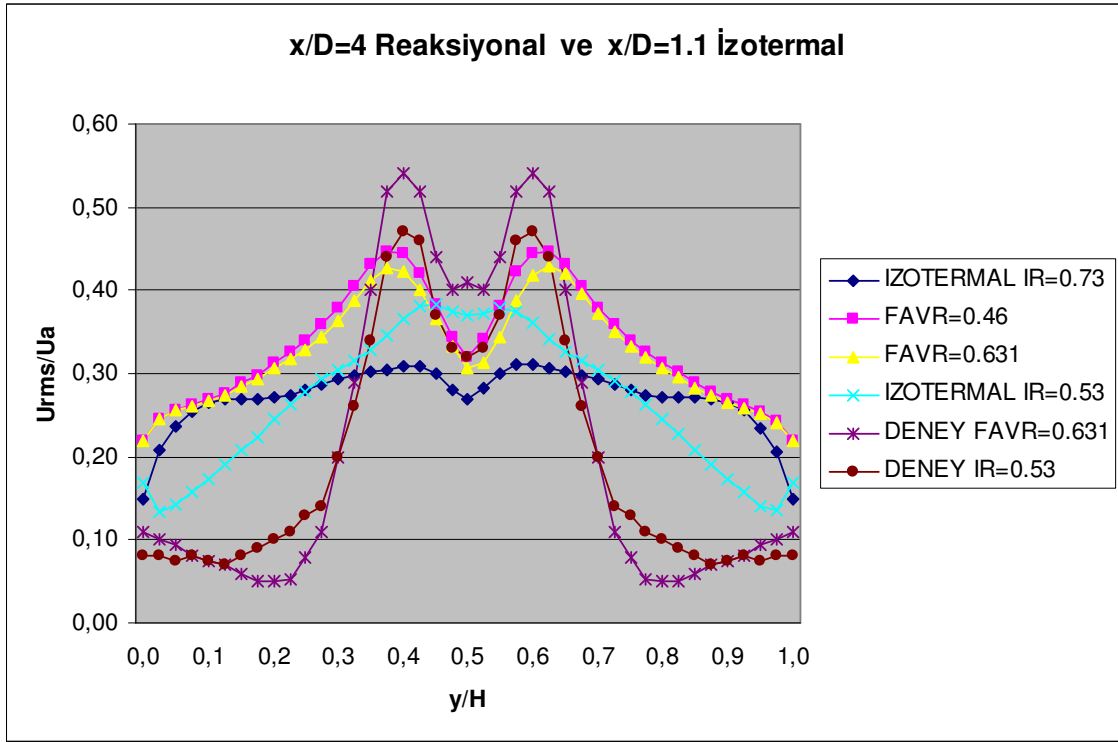




Şekil 3.41 Akım A  $X/D=1$  ve  $X/D=0.28$  için türbülans kinetik enerji profilleri



Şekil 3.42 Akım A  $X/D=3$  ve  $X/D=0.39$  için türbülans kinetik enerji profilleri



Şekil 3.43 Akım A  $X/D=4$  ve  $X/D=1.1$  için türbülans kinetik enerji profilleri

Hız grafikleri incelendiğinde hızların nozül simetri ekseninde minimum olduğu duvara yakın bölgelerde ise en yüksek değerlerine ulaştığı görülmektedir.  $X/D$  oranı arttıkça reaksiyonun olduğu durum ile izotermal durum arasındaki fark da belirgin bir şekilde atmaktadır. Deneyde elde edilen hızlar ile bizim bulduğumuz hızları karşılaştırdığımızda deneyde elde edilenlere göre nispeten daha büyük hızlar elde ettiğimiz görülmektedir. Bu durum özellikle reaksiyonel durumda daha belirgindir. Reaksiyonel duruma eşdeğer izotermal durumda deneydeki verilere daha fazla yaklaşmıştır.

Türbülans kinetik enerji grafikleri incelendiğinde türbülansın nozül çevresinde yüksek olduğu, duvarlara doğru yaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Genel olarak yanmanın olduğu durumda elde edilen türbülans değerleri daha yüksektir. Deneyde elde edilen maksimum değerler, reaksiyonel durumda  $x/D=0.75$  ve  $x/D=1$  için yakınlık gösterirken diğer  $X/D$  oranlarında ve duvara yakın bölgelerde ciddi farklılıklar gözlenmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği uzun zamandır uzay, otomotiv, elektronik gibi endüstrilerde sıklıkla kullanılmaktadır. Son zamanlarda, HAD kimyasal proseslerde ve hidrokarbon proses endüstrisinde güvenilir bir problem çözücü araç olarak yer edinmiştir. Mühendisler brülör teknoloji dizaynlarında rutin olarak HAD'ı kullanmaya yakın bir zamanda başlamışlardır. HAD mühendise önceleri öngörülmesi imkansız ve pahalı test prosedürleri gereksinen işletme parametrelerini inceleme fırsatı sunmuştur.

Yunanistan'ın Patras Üniversitesinde; A.G. BAKROZIS, D.D. PAPILIOU, ve P. KOUTMOS tarafından 1999 yılında yapılan deneydeki veriler baz alınarak benzer bir geometri için iki boyutlu bir brülörde yanma problemi FLUENT programı kullanılarak analiz edilmiştir. Farklı hava-yakıt oranlarına sahip üç alev için yapılan incelemede alev uzunluğunun hava-yakıt oranı düştükçe azaldığı gözlenmiştir. Sıcaklık genel olarak nozülün tam orta noktasında maksimum değere ulaşırken duvarlara yaklaştıkça sıcaklık düşmektedir. Hızların, nozül simetri ekseninde sıcaklığın tam tersine minimum değerine ulaştığı, duvara yakın bölgelerde ise en yüksek değerlerinde olduğu gözlenmiştir.

Daha önce yapılmış olan deneyde elde edilen veriler ile bu çalışmadaki sonuçlar karşılaştırıldığında; FLUENT ile hesaplanan sıcaklık ve hız değerlerinin deneydeki değerlerden seçilen geometrinin iki boyuta indirgenmesi ve yapılan kabuller neticesinde birtakım farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir.

**KAYNAKLAR**

Arif, H., (1999), "Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) to the Modeling of Flow in Horizontal Wells", Thesis for the Degree of Master of Science, The Department Of Petroleum Engineering of Stanford University, June 1999.

Bakrozis, A.G, Papailiou, D.D., Koutmos, P., (1999), "A Study of the Turbulent Structure of a Two-Dimensional Diffusion Flame Formed Behind a Slender Bluff-Body", *Combustion and Flame* 119:291-306 (1999).

Borghini, R., (1988), "Turbulent Combustion Modelling, *Prog. Energy Combust*", *Sci* 14, 245-292.

Carlson, B.G. and Lathrop, K.D., (1968), "Transport Theory-The Method of Discrete Ordinates, in *Computing Methods in Reactor Physics*", Greenspan, H., Kelber, C. N., and Okrent, D., Eds., Gordon Breach Science Publishers, New York.

Colannino, J., (2006), *Modeling of Combusting Systems A Practical Approach*, CRC Press.

Currie, I.G., (1974), *Fundamental Mechanics of Fluids*, McGraw-Hill Book Company, New York.

Gosman, A.D. and Lockwood, F.C., (1972) "Incorporation of a Flux Model for Radiation into a Finite Difference Procedure for Surface Calculations", 14th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1972, 661.

Jamaluddin, A.S. and Smith, P.J., (1992), "Discrete Ordinates Solution of Radiative Transfer Equation in Non-Axisymmetric Cylindrical Enclosures, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*", 6(2), 242, 1992.

Johnson, T.R. and Beer, J.M., (1972), "Radiative Heat Transfer in Furnaces: Further Development of the Zone Method of Analysis", 14th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1972, 69.

Hackert, C.L, Ellzey, J.L, and Ezekoye O.A., (1999), "Combustion and Heat Transfer in Model Two-Dimensional Porous Burners", *Combustion and Flame* 116:177-191.

Henneke, M., Smith, J.D., Jayakaran, J.D., and Lora, M., (2001) "Computational Fluid Dynamics (CFD) Based Combustion Modeling", *The John Zink Combustion Handbook*, Baukal, C. E., Ed., CRC Press, Boca Raton, FL.

Kim, S.E and Choudhury, D., (1995), "A Near Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient, ASME FED Vol. 217, Separated and Complex Flows", ASME.

Launder, B.E. and Spalding, D.B., (1972), "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", Academic Press, London, England.

Lora, M., Schnepfer, C., and Stephen, S., (2002) "Investigation of Duct Burner Design Using CFD Capabilities in Conjunction with Full-Scale Experiments", Proc. 6th Eur. Conf. On Industrial Furnaces and Boilers, Estoril, Portugal.

Magel H.C., Schneider R., Risio, B., Schnell, U., Hein, K.R.G., (1995), "Numerical Simulations of Utility Boilers with Advanced Combustion Technologies", Eighth International Symposium on Transport Phenomena in Combustion, San Francisco.

Magnaussen, B.F. and Hjertager, B.H., (1977), "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion", 16th Symp. (Int.) on Combustion, 1977, 719-727.

Marias, F., Puiggali, J.R., Quintard M. and Pitt, F., (2002), "Quality of CFD Models for Jet Flow Analysis for the Design of Burners and Boilers", Korean J. Chem. Eng., 19, 28-40 12002.

Menter, F.R., (1994), "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications.", AIAA Journal, 32(8):1598-1605.

Morkovin, M.V., (1962), "Effects of Compressibility on Turbulent Flow, The Mechanics of Turbulence", Gordon and Breach.

Oran, E.S., Boris, J. P., (2001), "Numerical Simulation of Reactive Flow, 2nd ed., Cambridge University Press", Cambridge, U.K.

Rogg, B., (1989), "Numerical Modelling and Computation of Reactive Stagnation-Point-Flows, in Computers and Experiments in Fluid Flow", Carlomagno, G. M. And Brebbia, C.A., Eds., Springer Verlag, Berlin, 1989, 75-85.

Smith, J.D., Lora, M., Hixon, E.M., Eldedge, T.,(2004), CFD in Burner Development, Industrial Burners Handbook, John Zink Co. LLC, Tulsa, Oklahoma, USA, CRC Press.

Smith, J.D. And Webster, T., (2002), "Using CFD to Solve Challenges of Ultra-Low  $NO_x$  Burner Retrofit in Refinery Process Heaters", Petroleum Technology Quarterly, July 2002.

Smith, P.J., Heap, M. P., and Kertamus, N. J., (1992), "Using Computational Combustion Simulations to Solve Industrial Problems", 92-JPGC-FACT-13, International Power Generation Conference, Atlanta, GA, October 18-22.

Spalding, D.B., (1971), "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames", 13th Symp. (Int.) on Combustion, 1971, 649-657.

Talu, Mihai D.L., Talu, Stefan D.L., Negru Mihai., (2007) "The Simulation Fields of Flow and Temperature into a Furnace of a Burning Installation of Methane as Consequence the Variation of Heat Density Burners Using Finite Element Method", Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Computers, Agios Nikolaos, Crete Island, Greece, July 26-28, 2007.

Tennekes, H, and Lumley, J.L., (1972), "A First Course in Turbulence", the MIT Pres, Cambridge, MA, 1972.

Varma, S.A., (1979), "Radiative Heat Transfer in a Pulverized Coal Flame, in Pulverized Coal Combustion and Gasification", Smoot, L. D. And Pratt, D. T., Eds., Plenum Pres, New York, 1979.

White, F.M., (1974), Viscous Fluid Flow, McGraw-Hill, New York.

Wilcox, D.C., (1993), Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., La Canada, CA.

**INTERNET KAYNAKLARI**

- (1) [www.cfd-online.com](http://www.cfd-online.com)
- (2) [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	14.01.1982	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1996-2000	Kabataş Erkek Lisesi
Lisans	2001-2006	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2007-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı

**Çalıştığı kurumlar**

2007-	Proaktif Mühendislik
-------	----------------------