

2003-393



TÜRKİYE BİLİMSEL VE  
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL  
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

**YAKITÇA FAKİR, ÖN KARIŞIMLI VE GAZLAŞTIRILMIŞ  
KARGAŞALI PÜSKÜRTMELİ YANMANIN SAYISAL  
BENZETİŞİMİ**

**( NUMERICAL SIMULATION OF LEAN PREMIXED AND  
PREVAPORISED TURBULENT SPRAY COMBUSTION )**

**PROJE NO : MİSAG-CNRS-1/2**

*65722*

*1.1.*

**Makina, Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri  
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material  
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant  
Committee**

**YAKITÇA FAKİR, ÖN KARIŞIMLI VE GAZLAŞTIRILMIŞ  
KARGAŞALI PÜSKÜRTMELİ YANMANIN SAYISAL  
BENZETİŞİMİ**

**( NUMERICAL SIMULATION OF LEAN PREMIXED AND  
PREVAPORISED TURBULENT SPRAY COMBUSTION )**

**PROJE NO : MİSAG-CNRS-1/2**

*65722*

*1.1.*

**PROF. DR. NEVİN SELÇUK  
PROF. DR. İ. SINAN AKMANDOR  
ARAŞ. GÖR. TANIL TARHAN**

**MAYIS-2003  
ANKARA**

## **ÖNSÖZ**

Bu araştırma, Türkiye (TÜBİTAK) – Fransa (CNRS) bilimsel ve teknik işbirliği çerçevesinde Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu tarafından MİSAG-CNRS-1 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Çalışma, “püskürtmeli sıvı yakıt ve hava içeren, ön karışım halindeki kargaşalı akış, 3 boyutlu bir Navier-Stokes çözümüsü kullanılarak sayısal benzetişimi” ve “çizgiler yöntemine dayalı karışmasız tepkimeli iki boyutlu Navier-Stokes doğrudan sayısal benzetişim kodunun düşük Reynolds sayılı türbülanslı sisteme uygulanması” olmak üzere iki bölümden oluşmuştur. Birinci bölüm ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde, ikinci bölüm ise ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, Fransa'nın Orleans kenti, LCSR (Laboratoire de Combustion et System Reactif) laboratuvarlarında elde edilen tepkimeli ve tepkimesiz heptan-hava deneylerinden yararlanılmıştır.

Bu projenin gerçekleşmesini sağlayan tüm kuruluşlara ve bu kuruluşların yardımlarını esirgemeyen elemanlarına katkıları için teşekkür ederiz.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	v
TABLO LİSTESİ .....	v
ÖZ .....	vii
ABSTRACT .....	viii
PROJE ANA METNİ .....	1
1. Sıvı-Gaz Fazlarını Bünyesinde Barındıran, Kargaşalı, Fakir Ön Karışım Halindeki Yakıt-Hava Aışının Navier-Stokes Çözücü İle İncelenmesi .....	1
1.a) Giriş ve Genel Bilgiler .....	1
1.b) Gereç ve Yöntem: Navier-Stokes Akış Algoritması ile Benzeşim .....	2
1.c) Gereç ve Yöntem: Yakıt tanecikleri ve Püskürtme Modeli .....	2
1.d) Bulgular ve Tartışma .....	3
1.e) Sonuç .....	5
1.f) Kaynakça .....	5
2. Çizgiler yöntemine dayalı karışmasız tepkimeli iki boyutlu Navier-Stokes doğrudan sayısal benzetişim kodunun düşük Reynolds sayılı türbülanslı sisteme uygulanması .....	12
2.a) Giriş ve Genel Bilgiler .....	12
2.b) Gereç ve Yöntem .....	13
2.b.1) Alev Levhası Modeli .....	13
2.b.2) Çizgiler Yöntemi ve ODE Çözüçüleri .....	13
2.b.3) Paralel Uygulama .....	14
2.c) Bulgular ve Tartışma .....	14
2.c.1) Laminar Tepkimeli Akış .....	15
2.c.1.1) ODE Çözücü Testi .....	15
2.c.1.2) Seri ve Paralel Kodunu Performans Testi .....	16
2.c.1.3) Durgun Durum Sonuçları .....	17
2.c.1.4) Zamana Bağlı Sonuçlar .....	17

2.c.2) Türbülanslı Tepkimeli Akış .....	19
2.c.2.1) Karışım Kesri Dağılımları .....	20
2.c.2.1) Sıcaklık Dağılımları .....	20
2.d) Sonuç .....	23
2.e) Kaynakça .....	23
<b>PROJE ÖZET BİLGİ FORMU .....</b>	<b>25</b>

Yazılım İmza:

Yazılım İmza:

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza:

Yazılım İmza:

Yazılım İmza:

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza:

Yazılım İmza:

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

Yazılım İmza: \_\_\_\_\_

## ŞEKİL LİSTESİ

<b>Şekil 1.1</b>	Eksenel simetriye sahip 2 boyutlu çözüm ağı .....	7
<b>Şekil 1.2</b>	Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol	
<b>Şekil 1.3</b>	Durum1: şablon problem .....	7
<b>Şekil 1.3</b>	Durum1'e ait yakınsama grafiği .....	8
<b>Şekil 1.4</b>	Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol	
	Durum2: heptan ve püskürme havası girişinde yüksek basınç .....	8
<b>Şekil 1.5</b>	Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol	
	Durum3: heptan girişinde yüksek hız .....	9
<b>Şekil 1.6</b>	Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol	
	Durum4: sabit ve iri yakıt taneciklerinin akım içerisinde gelişimi .....	9
<b>Şekil 1.7</b>	Mach sayısı dağılımı ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol	
	Durum4: sabit ve iri yakıt taneciklerinin akım içerisinde gelişimi .....	9
<b>Şekil 1.8</b>	Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol	
	Durum5: ani heptan-hava yanması ve yakıt buharlaşmasına etkisi .....	10
<b>Şekil 1.9</b>	Yanma Hacmi İçerideki Sıcaklık Dağılımı	
	Durum5: ani heptan-hava yanması .....	10
<b>Şekil 1.10</b>	Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol	
	Durum6: sonlu hızda heptan-hava yanması ve yakıt buharlaşmasına etkisi .....	11
<b>Şekil 1.11</b>	Yanma Hacmi İçerideki Sıcaklık Dağılımı	
	Durum6: sonlu hızda heptan-hava yanması .....	11
<b>Şekil 2.1</b>	Yayılım alevi yakıcısının şematik gösterimi .....	15
<b>Şekil 2.2</b>	ODE çözümcülerin CPU zamanlarının karşılaştırılması .....	16
<b>Şekil 2.3</b>	Hızlanma ve verimin işlemci sayısı ile değişimleri .....	17
<b>Şekil 2.4</b>	Hız, akım çizgileri ve sıcaklığın zaman bağlı değişimleri; a) 10 ms, b) 50 ms, a)10 ms, c) 100 ms, d) 150 ms, e) 200 ms, f) 280 ms, g) 340 ms, h) 400 ms, i) 450 ms, j) 500 ms, k) 750 ms, l) durgun durum .....	18
<b>Şekil 2.5</b>	$z = 35 \text{ cm}$ 'deki karışım kesrinin radyal dağılımı; çizgi: öngörüler, sembol: deneysel veri .....	21
<b>Şekil 2.6</b>	$z = 42.5 \text{ cm}$ 'deki karışım kesrinin radyal dağılımı; çizgi: öngörüler, sembol: deneysel veri .....	21

<b>Şekil 2.7</b>	eksenindeki karışım kesrinin dağılımı; çizgi: öngörümler, simbol: deneysel veri .....	21
<b>Şekil 2.8</b>	$z = 35 \text{ cm}$ 'deki sıcaklık radyal dağılımı; çizgi: öngörümler, simbol: deneysel veri .....	22
<b>Şekil 2.9</b>	$z = 42.5 \text{ cm}$ 'deki sıcaklık radyal dağılımı; çizgi: öngörümler, simbol: deneysel veri .....	22
<b>Şekil 2.10</b>	Simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı; çizgi: öngörümler, simbol: deneysel veri .....	22

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 2.1</b>	Laminar alev için geometrik parametreler ve sistemin çalışma şartları .....	15
<b>Tablo 2.2</b>	Turbülanslı alev için geometrik parametreler ve sistemin çalışma şartları .....	19

## ÖZ

Püskürtmeli heptan-hava, fakir karışımı, tepkimeli akımın sayısal benzeşimi yapılmıştır. Çalışmada birinci amaç, yakıt taneciklerinin izlediği yol ile yol boyunca taneciklerinin boyutlarındaki değişiklikleri hesaplamaktır. İkinci amaç ise, buharlaşma ile sıvı yakıt-hava karışım olaylarını yatkın durum için incelemektir. Problem geometrisi, eş eksenel, değişik çapta ve uzunluktaki 3 borunun, silindrik bir yanma odasına açılmalardan oluşmaktadır. En içteki boru sıvı heptan yakıtını, onun etrafındaki boru püskürtme havasını, en dıştaki boru ise yanma havasını taşımaktadır. Buharlaşmayı ve karışmayı etkileyen başlıca etkenler arasında, noktasal sıcaklık değerleri, her üç akımının giriş hızları ve basınç değerleri, girişteki yakıt tanecik yoğunluğu ve boyut dağılımları olduğu görülmüştür.

Projenin ilk yılında geliştirilmiş olan çizgiler yöntemine dayalı laminar karışmasız tepkimeli iki boyutlu zamana bağlı paralel Navier-Stokes doğrudan sayısal benzetişim (DNS) kodun performansının artırılmasına yönelik ilave çalışmalar yapılmış, kapalı eksenel simetriye sahip laminar metan-hava yakıcısına uygulanarak test edilmiştir. Performans artışının tespitini takiben, kod düşük Reynolds sayılı türbülanslı simetrik ortak akışlı metan-hava yayılım alevinin öngörülmesine uygulanmıştır. Sıcaklık ve karışım kesri öngörümleri deneySEL verilerle karşılaştırılarak kodun makul sonuçlar verdiği görülmüştür. Daha hassas çözümler için detaylı kimyasal tepkime modellerinin koda eklenmesi gereği tespit edilmiştir. Kodda kullanılan alev levhası modeli ile elde edilen çözümler, detaylı kimyasal tepkime modellerinin geliştirilmesi ve hesaplamalar için gereken zamanlarda önemli azalmalar sağlayacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Sıvı-gaz Navier-Stokes çözümü, fakir karışımı yakıt püskürtmesi, metan yayılım alevi, çizgiler yöntemi, alev levhası modeli, türbülans, paralel hesaplama

## ABSTRACT

Numerical simulation of a spray heptan-air, lean reactive flow has been achieved. The first objective is to calculate the flow path of the liquid fuel droplets and their size change. The second objective is to calculate the vaporization and steady state mixing of fuel-air. Geometry has 3 concentric inlet pipes having different radius and length, connecting to a cylindrical combustion volume. The inner pipe carries liquid heptane, the next pipe carries the spray air and the outer pipe carries combustion air. Parameters that affect evaporation and mixing are local temperature, inlet flow velocities and pressures and initial fuel droplet density and size distribution.

Performance of the transient two-dimensional parallel direct numerical simulation (DNS) Navier-Stokes code based on the method of lines developed recently for non-premixed confined axisymmetric laminar reacting system was improved and tested by applying it to the confined symmetric laminar methane-air burner. Then the code was applied to the prediction of low Reynolds number turbulent symmetric coflowing methane-air diffusion flame for which steady-state experimental data is available. Temperature and mixture fraction predictions of the code was found to be in favourable agreement with experimental data. It was also found that in order to have more accurate solutions detailed chemistry models should be incorporated into the present code. The flame sheet model used in the present code will serve as a basis for the development of the detailed chemistry models and will shorten the execution time and model development period.

ANURAG KUMAR AND RAVI KUMAR

Department of Mechanical Engineering

**Keywords:** Two-fluid (liquid-gas) Navier-Stokes solver, lean fuel spray, diffusion flame, *method of lines*, flame sheet model, turbulence, parallel computation

JUGDUL MEHTA

Department of Mechanical Engineering

PIYUSH KUMAR

Department of Mechanical Engineering

RAVINDRA KUMAR

Department of Mechanical Engineering

## **PROJE ANA METNİ**

Projenin ikinci yılında *i)* fakir karışım halindeki kısmen buharlaşmış hava/yakıt akışı, sıvı/gaz fazlarına haiz bir Navier-Stokes çözümü ile sıvı yakıt taneciklerinin takip ettileri yol ve bu yol boyunca boyutlarında ve yoğunluklarında meydana gelen değişikliklerin incelenmesi, *ii)* Çizgiler yöntemine dayalı karışmasız tepkimeli iki boyutlu Navier-Stokes doğrudan sayısal benzetşim kodunun düşük Reynolds sayılı türbülanslı sisteme uygulanması planlanmıştır. Bu plan çerçevesinde yapılan çalışmalar kendi başlıklarını altında verilmektedir.

### **1. Fakir karışım halindeki kısmen buharlaşmış yakıt/hava akışının, sıvı/gaz fazlı bir Navier-Stokes çözümü ile incelenmesi**

#### **1.a) Giriş ve Genel Bilgiler**

Fakir karışımı sağlanmış ve yanma öncesi yakıtın tam buharlaşması gerçekleşen gaz türbin yanmalarında, önemli ölçüde  $\text{NO}_x$  emisyon azalması kaydedilmektedir. Buharlaşma ve fakir miktarlarda karıştırılan yakit ve hava, düşük alev sıcaklıklarına yol açmaktadır, bu da azot oksit üretimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak ön buharlaşma ve ön karışım zamanı olan yanmalarda, yakıt/hava karışımı tüm akış bölgelerine eşit olarak dağılmaz ise, bölgesel olarak yakıt zengini cepler meydana gelmekte ve  $\text{NO}_x$  üretimi böylelikle artmaktadır. Bölgeler arasında farklılık, yakıt püskürtmesinin tanecikleşme (atomizasyon) mertebesine, damlacık dağılımına ve buharlaşma hızına bağlıdır [1-3]. Yanma öncesi tam buharlaşma ve eşdüzgün (homojen) karışım hedeflendiğinde, yakıtın kendi kendine alev alması, alev geri tepmesi, hava/yakıt oranları ve yanma süresi üzerinde kısıtlayıcı unsurlar oldukları anlaşılmıştır [4-7]. Fransa'nın Orleans kenti, LCRS (Laboratoire de Combustion et System Reactif) laboratuvarlarında daha çok konu ile ilgili detaylı deneyler yapılmış ve yapılmaktadır [1-7]. Bu çalışmaların ana amacı, tanecikleşme, buharlaşma ve yanma etkenleri (parametreleri) arasında ve düşük  $\text{NO}_x$  emisyonu etkileyen değişkenler arasında uygun dengeyi sağlamaktır. Hava/yakıt karışımının, yakıt damlacık yoğunluğu ve püsküren yakıt hüzmesi içerisindeki damlacık büyülüklük dağılımı ile etkilendiği görülmektedir. Kargaşanın (turbülansın) da birincil ve ikincil tanecikleşme için önemli bir görev üstlenmekte olduğu görülmüştür [4-5]. Üç eksenli (coaxial) akışda önem arz eden diğer bir etkende de, giriş akımlarının momentumudur. Bir diğer önemli parametre de hazne giriş basınçlarıdır [6]. Bu çalışmada, kısmen buharlaşmış ve fakir karışım halindeki heptan/hava kargaşalı akışları, tepkimesiz ve tepkimeli olarak

inceLENmektedir. Problemin önemli etkenleri başlıca, hava ve yakıt giriş hız ve basınç oranları, yanmaya kadar akış süreci, buharlaşma modeli, eş-eksenel boru çap oranları olarak sıralayabiliriz. 3 boyutlu ve sıvı gaz akış birleşkelerini (mixture) çözebilen hazır yazılım bir Navier-Stokes algoritması, hesaplamalar için kullanılmıştır. Eş-eksenel üç borudan çıkan jet akışlarının karışımı ve sıvı yakıtın buharlaşma aşamaları hesaplanmıştır. Böylelikle, yanmalı akış bölgesinin sayısal olarak benzeşimi yapılmıştır.

### **1.b) Gereç ve Yöntem: Navier-Stokes Akış Algoritması ile Benzeşim**

Yakıtça fakir karışıklı ve buharlaştırılmış kargaşalı püskürtmeli yanmanın sayısal benzeşimi CFDRC-ACE [12] hazır yazım çözümüsü kullanılarak yapılmıştır. 2-fazlı, 3-boyutlu, zamana bağlı, sonlu hacim Navier-Stokes denklemleri çözülmüştür. Korunmuş şekildeki denklemler (conservative equations), çözüm noktaları etrafında oluşturulan sonlu  $\vartheta$ - hacmi içinde ve etrafında çözülmektedir. Madde, kimyasal tür, moment ve enerjinin korunması genel olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$\int \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} d\vartheta + \int \nabla \bullet (\rho \vec{V}\phi) d\vartheta = \int \nabla \bullet (\Gamma \nabla \phi) d\vartheta + \int S_\phi d\vartheta$$

Soldaki birinci terim zamana bağlı değişimleri, soldaki ikinci terim, sürükleme (konveksiyon) ile ilgili korunumu, sağdaki birinci terim sızma (difüzyon) ve sağdaki son terim ise madde, moment veya enerji denklemlerinde açığa çıkacak kaynakları göstermektedir.  $\phi$  değişkeni sırasıyla, madde korunun denklemi için 1 değerini almaktır, moment denklemleri için sırasıyla, ana akış yönündeki hız  $u$  veya radial yönündeki hız  $v$  değerlerini almaktır, enerji korunumu için, entalpi  $h$  değerini almaktır, kimyasal türlerinin korunum denklemleri için, türlerin konsantrasyon değerlerini temsil etmekte, kargaşa ait enerji üretim denklemi için, hızal (kinetik) enerji  $k$  değerini almaktır, kargaşa ait enerji harcama denklemi için, hızal enerjinin boş harcama değeri olan  $\epsilon$ 'nu temsil etmektedir. SIMPLEC [12] algoritma sıralamasına uyarak, değişkenlerin çözüm alanı üzerindeki değerleri hesaplanmıştır. Kargaşa (turbülans) hesaplamaları standart  $k-\epsilon$  modeli kullanılarak yapılmıştır.

### **1.c) Gereç ve Yöntem: Yakıt tanecikleri ve Püskürtme Modeli**

Yakıt taneciklerine ait konum ve boyut hesaplarında, Eulerian-Lagrangian yöntemi kullanılmıştır. Taneciklere ait taşıma denklemi aşağıda verilmiştir [13].

$$m_d \frac{dv}{dt} = C_D \rho (U - v) |U - v| \frac{A_d}{2} - g_d \nabla p + m_d g$$

Bu denklemde  $m_d$  damla kütlesini,  $v$  damla hızını,  $C_D$  damla ile akış arasında olan sürtünme katsayısını,  $\rho$ ,  $U$  ve  $p$  damlayı içinde sürükleyen akış yoğunluğunu, hızını ve basincını,  $A_d$  damla yüzey alanını,  $\vartheta_d$  damla hacmini temsil etmektedir. Damla buharlaşma denklemi ise aşağıda açıklanmıştır:

$$\dot{m}_{ev} = 2\pi d \rho \Gamma_m Sh \ln(1 + B_m)$$

Bu denklemde  $\dot{m}_{ev}$  damla kütle değişim (buharlaşma) türevini,  $d$  damla çapını,  $\Gamma_m$  gaz için kütle sızma (difüzyon) katsayısını,  $Sh$  Sherwood sayısını,  $B_m$  Spalding sayısını temsil etmektedir. Sıvı taneciklere ait enerji denklemi ise aşağıya çıkarılmıştır:

$$m_d C_d \frac{dT_d}{dt} = \pi d^2 \dot{q} - \dot{m}_{ev} L$$

Bu denklemde  $C_d$  damlanın özgül ısısını,  $T_d$  damla sıcaklığını,  $\dot{q}$  damlaya aktarılan hissedilen isiyı,  $L$  ise sıvı-gaz faz değişiminden doğan enerjiyi temsil etmektedir.

#### 1.d) Bulgular ve Tartışma:

Bu çalışmada, benzeşim bölgesi silindirik bir bölge olarak tasarlandığından, eş-eksenel 2 boyutlu akış olarak çözülebilmektedir. Çözüm ağı Şekil 1.1 de verilmiştir: hesaplama alanı, ana akış yönünde 76, radial yönde 58 nokta ile taramaktadır. CNRS-LCRS laboratuuarında yürütülen ve kaynak [1]'e uyumlu olarak üretilen çözüm ağında, heptan boru iç yarıçapı 2 mm, boru et kalınlığıda 2 mm alınmıştır. Hava püskürtme boru iç çapı 8mm, boru et kalınlığı 2 mm olarak alınmıştır. Yanma hava boru çapı ise yanma odası yarı çapına eşit alınmıştır: 80mm. Heptan yakıt borusu uzunluğu 50 mm, püskürtme havası boru uzunluğu 100mm, yanma odası uzunluğu ise 600mm olarak alınmıştır. Eş-eksenli bu akışların hızları, kaynak [1]'e uygun olarak saptanmıştır: Durum1, Durum2, Durum4, Durum5, Durum6 olarak nitelenen problemlerde heptan akış hızı hep 10m/sn olarak alınmıştır. Bir tek Durum2'de heptan giriş hızı 50m./sn olarak alınmıştır. Püskürtme havası hızı ise bütün problemlerde 50m/sn. olarak alınmış, dış yanma havası akış hızının 2.9 m/sn. olduğu kabul edilmiştir.

Durum 1'de ele alınan problem, kaynak [1]'de deneysel olarak yapılan çalışmaya yakındır. Şekil 1.2'de verildiği gibi yakıt tanecikleri hep püskürtme havası hüzmesi içinde kalmaktadırlar. Heptan girişinde, tanecik dağılımı 20 mikron, 40 mikron, 60 mikron, 80 mikron ve 100 mikron çapında oldukları varsayılmıştır. Ayrıca, yanma odası girişinde, bu yakıt damalarının radial yönde büyülüük dağılımı, eşdüzgün (homojen) olarak kabul edilmiştir. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi, heptan yakıt borusunun ağzına doğru tanecikler

ufalanmakta ve 20-30 mikron gibi daha küçük damlalar haline dönüştürmektedirler. Ancak püskürtme havası ile karşılaşan bu tanecikler, önceleri birleşerek daha büyük damla haline gelmekte (80 mikron civarı) ancak daha sonra, hız ve basınç farklılıklarından ve buharlaşmadan dolayı hızla küçülmektedirler. Tanecikler, sıvı durumlarını ancak bir boru uzunluğu kadar (100 mm) koruyabilmektedeler. Durum1'de açıklanan problem'in yakınsaması (Şekil 1.3) bekleniği gibi 6000 döngü civarında 4 mertebe düşmektedir. Durum2'de işlenen problem, Durum1'den sadece giriş basınçları olarak farklıdır. Durum1'de bütün akışlar 1 atm'de yanma odasına giriş yaparken, Durum2'de heptan basıncı 2 atm.'ye, püskürtme havası basıncı ise 3 atm.'ye çıkarılmaktadır. Şekil 1.4 püskürtme giriş basıncının akış kargasasını ve karışımı artırdığı görülmektedir. Yakıt tanecikleri püskürtme hüzmesi içinde daha geniş ve uzun bir alanı kaplamaktadır. Şekil 1.3, daha büyük ve daha ağır olan (80 mikron civarında) taneciklerin daha yavaş olan püskürtme havasının kenarlarına itildiği görülmektedir. Oysa Şekil 1.4'de, püskürtme havasının yüksek giriş basıncında etkisi ile daha kargaşalı hale geldiği, yakıt-hava karışımının buharlaşma öncesi başladığı ve tanecik dağılımının daha eşdüzgün (homojen) olduğu görülmektedir. Ayrıca püskürtme akımı girişinde uygulanan yüksek basıncın, buharlaşmayı geciktirdiği ve sıvı yakıt taneciklerinin Şekil 1.3'e oranla daha uzağa gittiği görülmektedir.

Durum3'de işlenen problem, Durum1'den, heptan giriş hızının 50 m/sn.'ye çıkarılmasını ile farklılaşmaktadır. Buna göre, Şekil 1.5'teki yüksek giriş hızı, yakıt akış hüzmesini inceltmekte, yakıt-hava karışımını ve yakıt buharlaşmasını gecitmektedir. Ancak yakıt akışı tek başına incelendiğinde, damla büyülüklüklerinin bu akış içerisinde daha eşdüzgün olarak dağıldığı görülmektedir.

Durum4'den Durum1'den farkı, yakıt borusu girişinde tek boyutlu (500 mikron) iri taneciklerden oluşan bir sıvı akış olmasıdır. Şekil 1.6'dan görüldüğü gibi, iri tanecikler çok daha uzun süre püskürtme hüzmesi içinde sıvı hallerini korumaktadırlar. Bu taneciklerin yol uzunluğu, hemen hemen yanma odası kadar, yani 600 mm olabilmektedir. Damla büyülüüğündeki yol boyunca küçülme de çok çarpıcı bir şekilde, Şekil 1.6'da sergilenmektedir. Özellikle 300 mikron'a geriledikten sonra, damla boyutunun çok hızlı şekilde küçüldüğü görülmektedir. Aynı akışın Mach sayısı dağılımı Şekil 1.7'de verilmiştir. Tipik jet akış hüzmesi yapısını taşımaktadır: yani püskürtme havasının Mach sayısı, bir boru uzunluğu kadar sonra (100mm), yarı yarıya düşmektedir.

Durum5'de, Durum1'de işlenen problem'den farkı, aynı sınır şartlarını taşımakla beraber, bu defa akışta, ani heptan-hava tepkime modelinin uygulanmasıdır. Şekil 1.8'de görüldüğü gibi

taneciklerin katettiği yol boyu, olağanüstü bir şekilde kısalmıştır ve tanecikler püskürme borusu içinde kalmıştır. Bunun en büyük sebebi, Şekil 1.9'da gözüktüğü gibi tepkimeli akışın çok yüksek sıcaklık derecelerine ulaşmasıdır. Hatta püskürme borusu içinde bile sıcaklık 1000 K civarındadır.

Durum 6'daki akış, Durum 1'de işlenen problem ile aynı sınır şartları taşımakla beraber, bu defa sonlu heptan-hava tepkime hızları ile yanma olayı dahil edilmiştir. Şekil 1.10'da yakıt taneciklerinin, Şekil 1.2'den daha uzağa gittikleri görülmektedir. Bunun sebebi bölge sıcaklığının yükselmesinin püskürtülen akışın önündeki direnci azaltmasıdır. Buna göre, ön karışım bölgesinde tam buharlaşma ancak alev önlerinde oluşmaktadır ve sıvı damllalar, Şekil 1.2'den çok daha küçük olmalarına karşın daha uzun süre akış içerisinde kalmaktadırlar. Şekil 1.11'de, sonlu tepkime hızları ile hesaplanan sıcaklık dağılımı sunulmuştur. Fakir ön-karışımı yanmadan beklentiği gibi sıcaklık mertebesi, ani yanmaya oranla çok daha düşüktür; en yüksek sıcaklık derecesi 1199 K'dır. Oysa kaynak [3]'de verilen değerler 1800 K civarındadır. Aynı kaynaktan gösterilen alev şekilleri de daha çok, ani tepkimeli yanmaya yakındır. Bu sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, sayısal çözümde kullanılan sonlu tepkime hızının yavaş kaldığı ortaya çıkmaktadır.

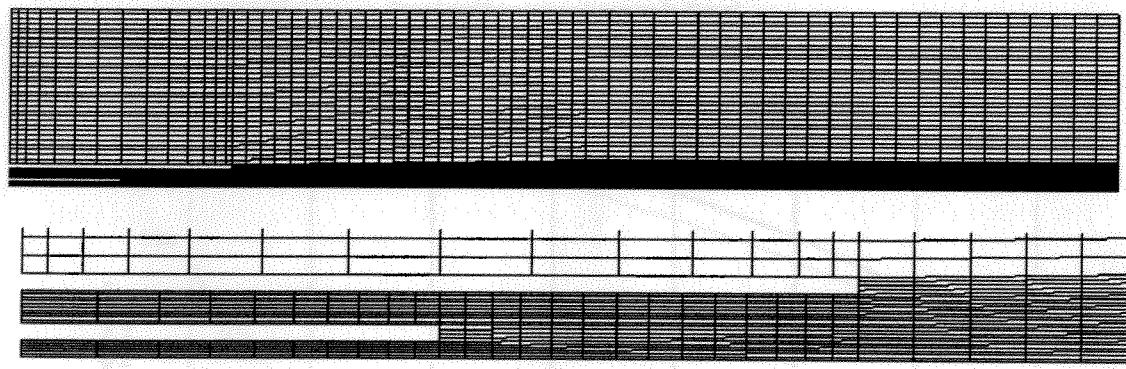
### 1.e) Sonuç:

Navier-Stokes sıvı-gaz akış algoritması, ön-karışıklı, ön buharlaşmalı problem için uyarlanmıştır. Buharlaşma modeli Navier-Stokes çözümü ile akuple edilmiştir. Proje öneri formunda ikinci sene için önerilen çalışma kapsamı tam olarak karşılanmıştır. Hatta tepkimeli çözümlerde dahil edilmek sureti ile, vaat edilen ikinci sene hedefi asılmıştır.

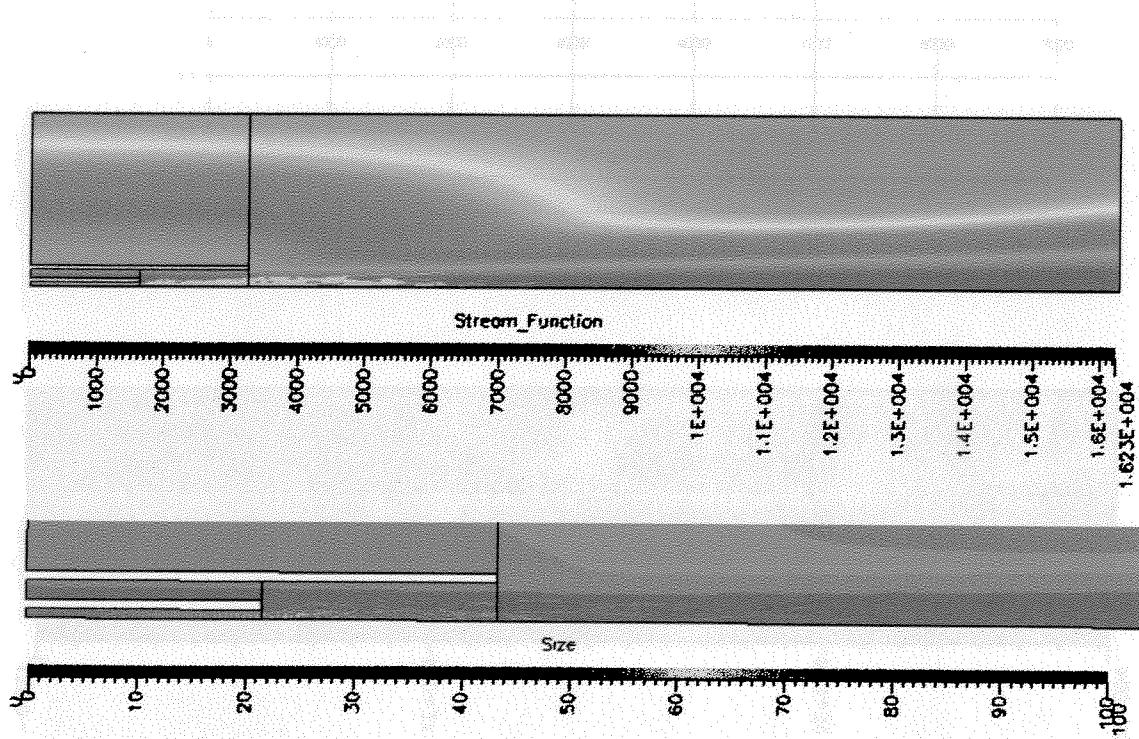
### 1.f) Kaynakça:

1. Michou Y., Chauveau C., Gokalp I., "Experimental study of lean premixed and prevaporised turbulent spray combustion" AIAA 99-0332, Reno-Nevada, 11-14 January 1999.
2. Michou Y., Pichard C., Chauveau C., Gokalp I., "An experimental study of lean partially prevaporised and premixed turbulent spray combustion", ILASS-Europe 2001, Zurich, 2-6 September 2001.
3. Michou Y., "Etude experimental de flamme diphasiques turbulentes, partiellement premeleangees et prevaporisees d'un melange pauvre heptane-air", Doktora Tezi, LCSR-Orleans, 29/11/2000.

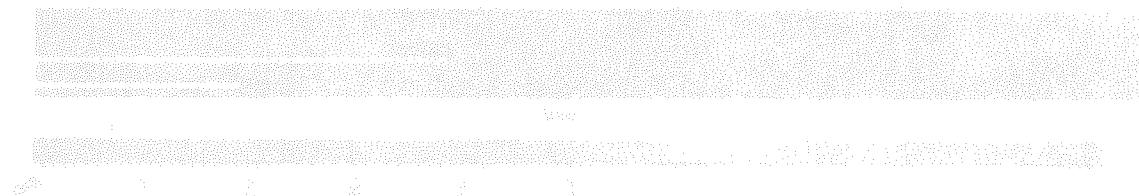
4. Vieille B., "Etude experimentale de l'atomisation secondaire de gouttes d'oxygene liquide. Influence de la pression", Doktora Tezi, LCRS-Orleans 17/12/1998.
5. Birouk M., "Influence de la turbulence homogene et isotrope sur la vaporisation et la combustion de gouttes de combustibles liquides", Doktora Tezi, LCRS-Orleans 27/2/1996.
6. Morin C., "Vaporisation et oxydation a haute temperature et haute pression de gouttes de combustibles liquides. Application aux n-alcanes et esters methyliques d'huile vegetales", Doktora Tezi, LCRS-Orleans 15/12/1999.
7. Gökalp I; Chauveau C.; Morin C.; Vieille B.; Birouk M., "Improving Droplet Breakup and vaporization Models by Including High Pressure and Turbulence Effects", *Atomization and Spray*, Vol.10, pp.475-510, 2000.
8. Akmandor I.S., Nagashima T., "Mass Flux and Shock Jump Calculations Through Cryogenic Two-phase Nozzle Flow", *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.14, No.3, pp.452-455, (2000).
9. Akmandor I.S., Nagashima T., "Analytical Shock Jump Formulae for Cryogenic Homogeneous Two-Phase Nozzle Flow" *Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (JSASS)* Vol.43, No.140, pp.67-76, (2000).
10. Akmandor I.S., Nagashima T. , "Predictions for Cryogenic Homogeneous Two-Phase Flows in Choked Laval Nozzles" *AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol.13, No.3, pp.355-363, (1999).
11. Akmandor I.S., Nagashima T. , "Newton-Raphson Solution of Cryogenic Homogeneous Two-Phase Flow in Convergent-Divergent Nozzles" *Transaction of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (JSASS)* Vol.40, No.127, pp.40-58, (1997).
12. CFD-ACE, Theory manual, Version 4.0, CFDRC, CFD Research Corporation, Huntsville Alabama 35805, February 1998, pp.2.1-2.10, 3.1-3.13, 7.1-7.11
13. CFD-ACE, Modules, Version 2002, CFDRC, CFD Research Corporation, Huntsville Alabama 35805, 21 March 2002, pp.14.1-14.39



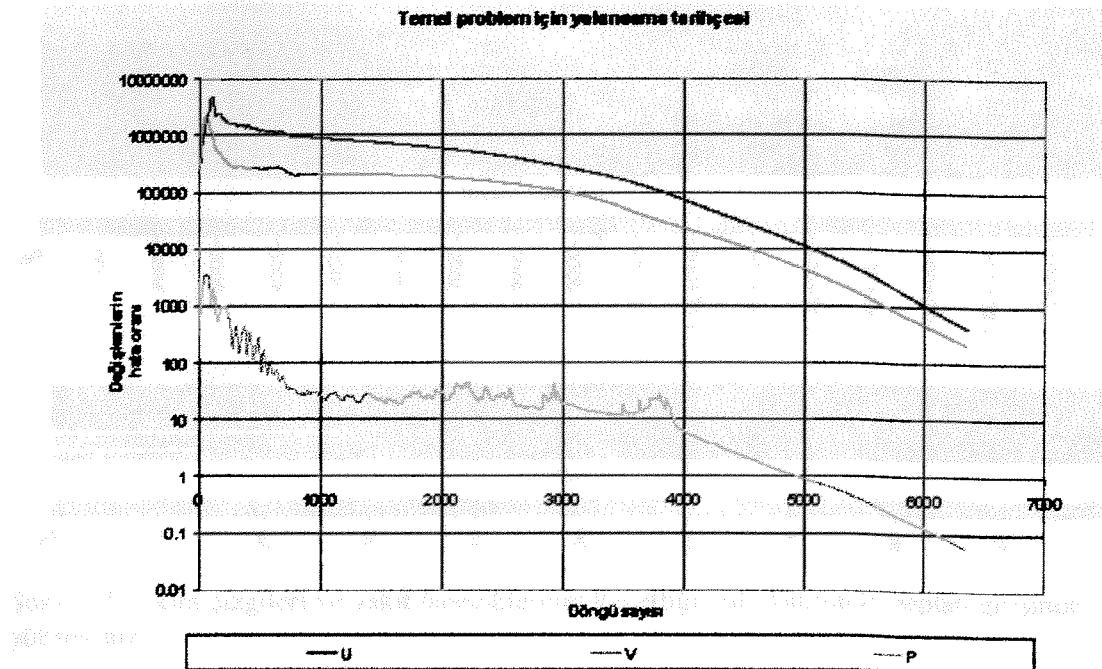
Şekil 1.1: Eksenel simetriye sahip 2 boyutlu çözüm ağı



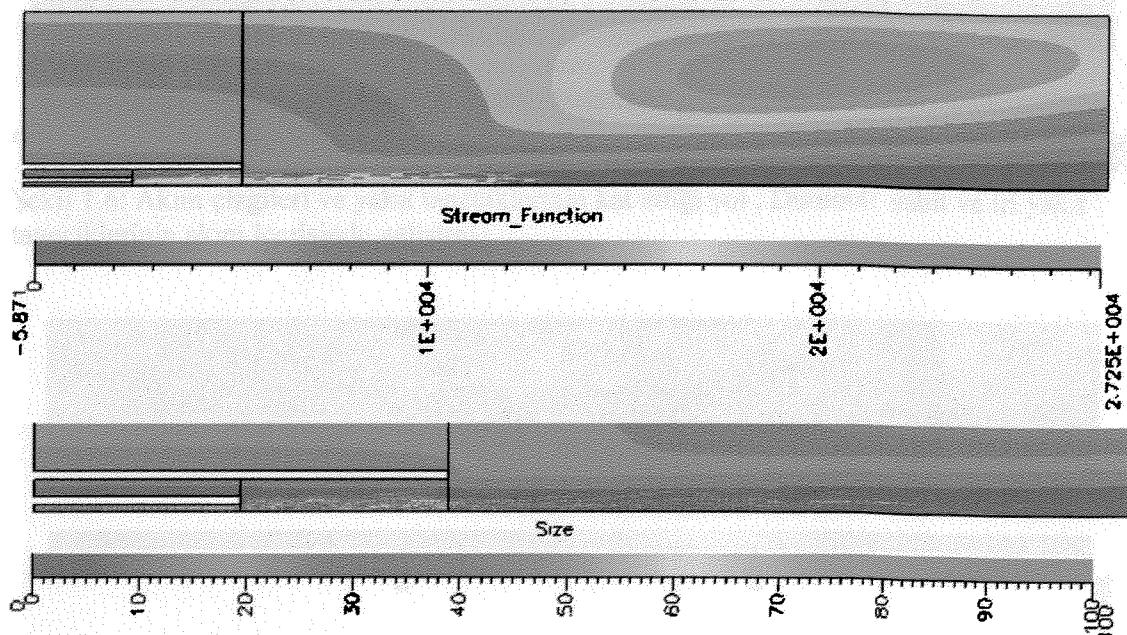
Şekil 1.2: Akım izgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol . Durum1: şablon problem



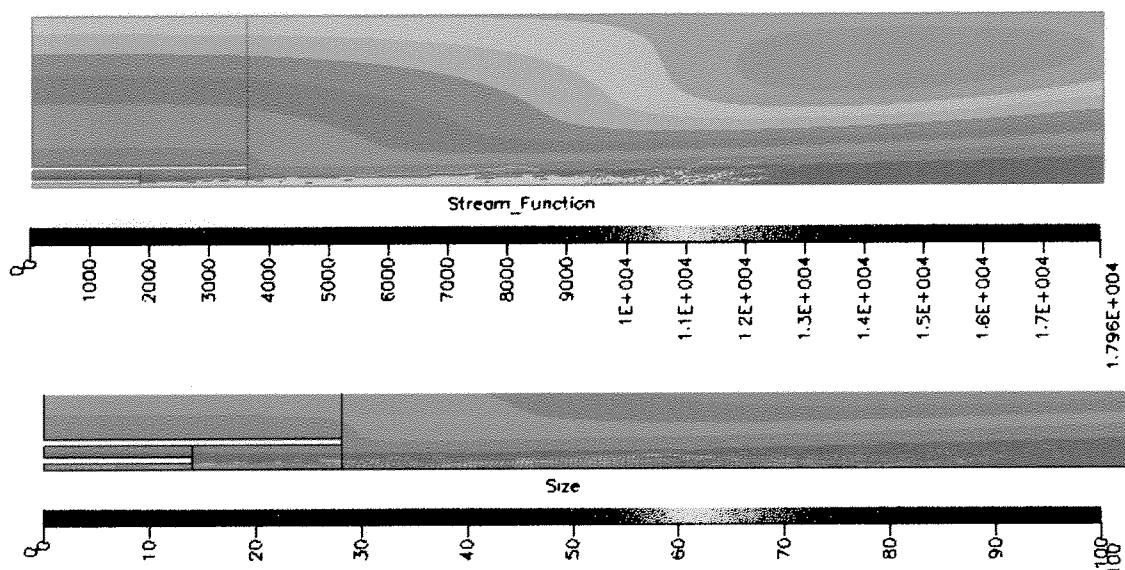
Şekil 1.4: Akım izgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol . Durum1: şablon problem



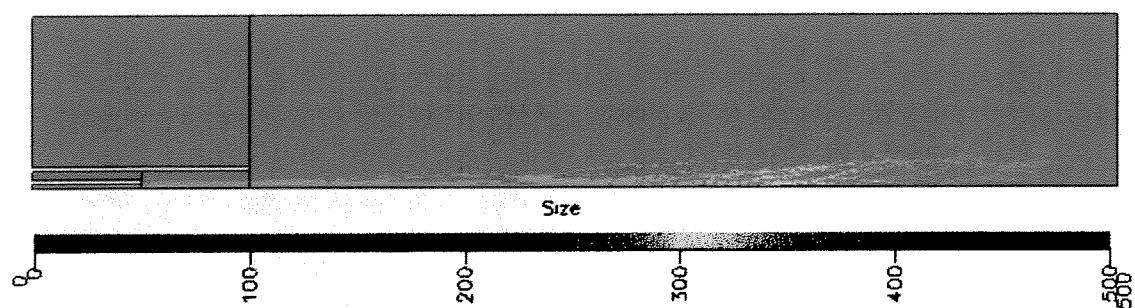
Şekil 1.3: Durum1'e ait yakınsama grafiği



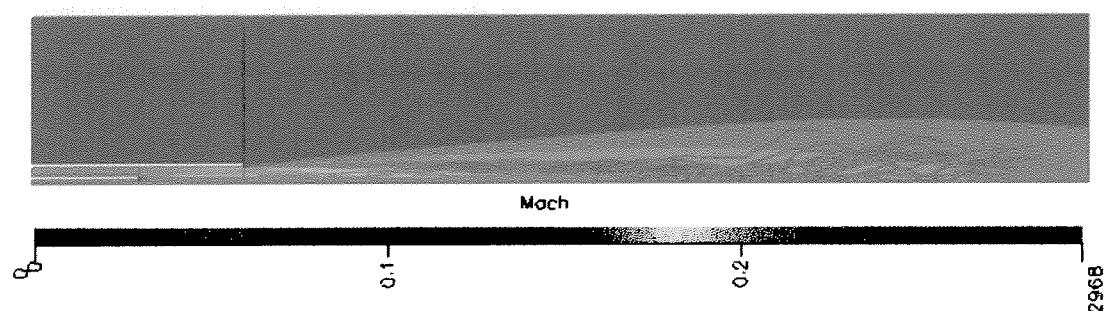
Şekil 1.4: Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat etiği yol . Durum2: heptan ve püskürme havası girişinde yüksek basınç



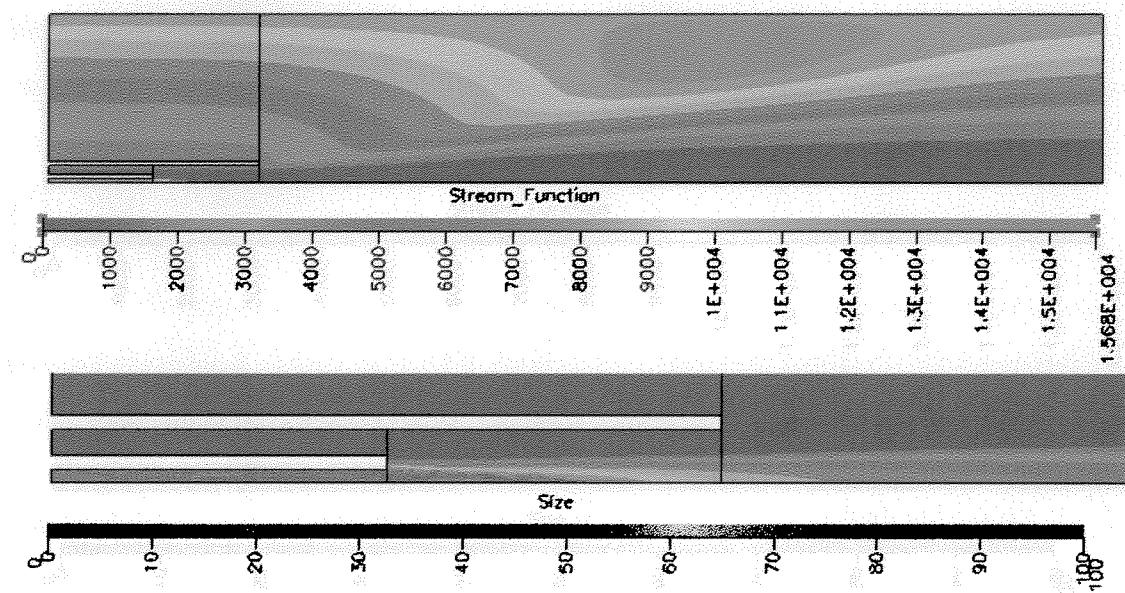
Şekil 1.5: Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol . Durum3: heptan girişinde yüksek hız



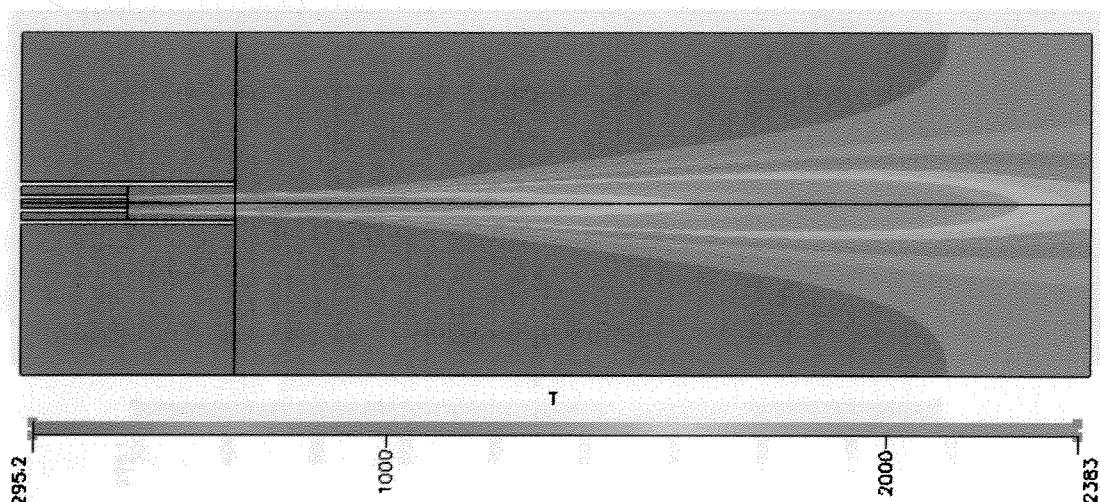
Şekil 1.6: Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol . Durum4: sabit ve iri yakıt taneciklerinin akım içerisinde gelişimi



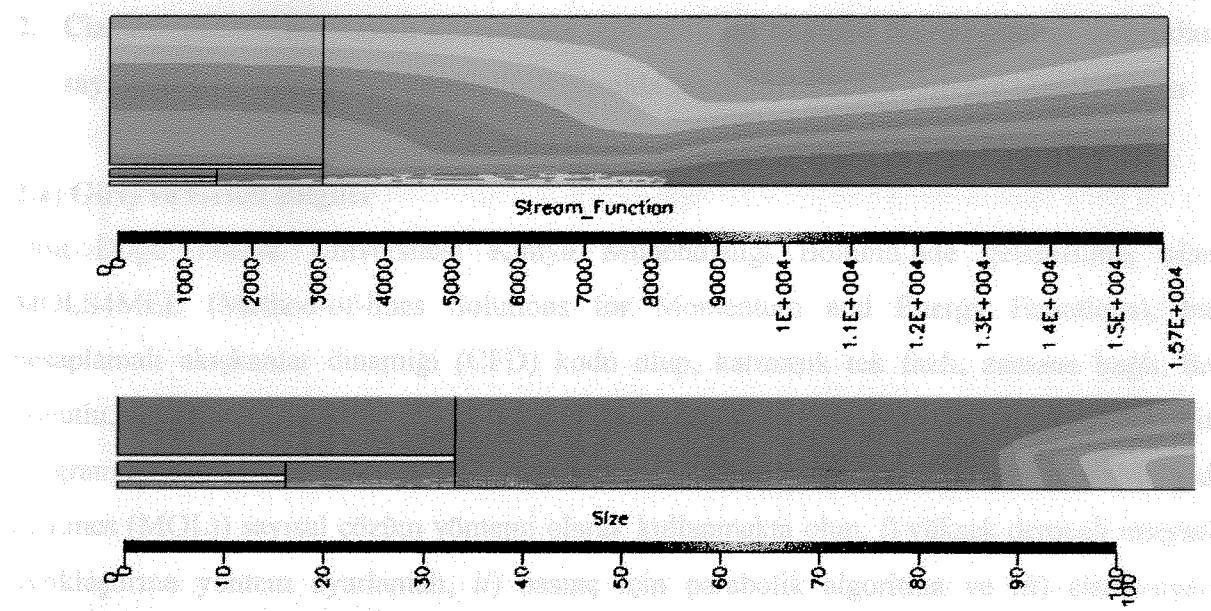
Şekil 1.7: Mach sayısı dağılımı ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol . Durum4: sabit ve iri yakıt taneciklerinin akım içerisinde gelişimi



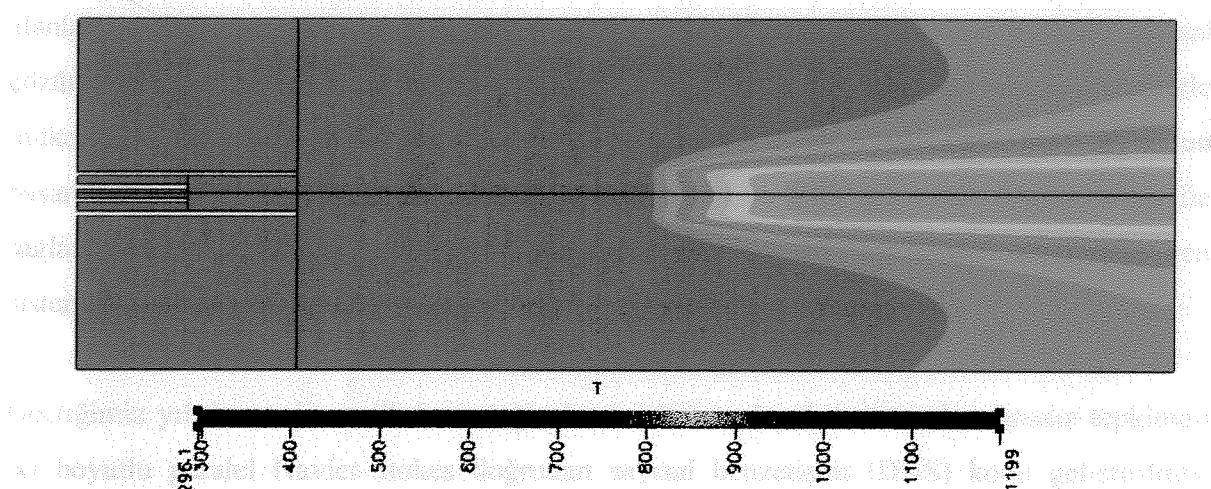
Şekil 1.8: Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol . Durum5: ani heptan-hava yanması ve yakıt buharlaşmasına etkisi



Şekil 1.9: Yanma Hacmi İçerindeki Sıcaklık Dağılımı. Durum5: ani heptan-hava yanması



Şekil 1.10: Akım çizgileri ve yakıt taneciklerinin kat ettiği yol . Durum6: sonlu hızda heptan-hava yanması ve yakıt buharlaşmasına etkisi



Şekil 1.11: Yanma Hacmi İçerideki Sıcaklık Dağılımı. Durum 6: sonlu hızda heptan-hava yanması

## **2. Çizgiler yöntemine dayalı karışmasız tepkimeli iki boyutlu Navier-Stokes doğrudan sayısal benzetişim kodunun düşük Reynolds sayılı türbülanslı sisteme uygulanması**

### **2.a) Giriş ve Genel Bilgiler**

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde geliştirilmiş olan MOLS4MEE (Method-of-lines Solutions for Momentum and Energy Equations), bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kodu olup, karmaşık tek fazlı, zamana bağlı, iki boyutlu, sıkışmaz, tepkimesiz iç akımların hesaplanması için geliştirilmiş genel bir programdır (OYMAK, 1997; SELÇUK ve OYMAK, 1999). Kod, çizgiler yöntemini (Method of Lines (MOL)) sayısal çözüm yöntemi olarak kullanmaktadır; *i*) yüksek dereceli uzaysal ayriklaştırma yöntem uyardırmalı, *ii*) basınç için parabolik algoritma ve *iii*) cisme-uyan koordinat sistemi kullanan eliptik ağ oluşturucu ile birlikte karmaşık silindirik geometrilere uygulanmaktadır. Kodun geçerliliği ve öngörme kapasitesi, laminar ve türbülanslı akış alanlarına uygulanarak ve hesaplanan değerler ölçümlerle ve literatürde bulunan sayısal çözümlerle karşılaştırılarak test edilmiştir. Hesaplanan laminar akım alanlarının ölçümlerle mükemmel bir uyum içinde olduğu saptanmıştır. Türbülanslı akımlar için ise kodun başarısının ağıdaki nokta sayısına bağlı olduğu ve bu sayının günümüz bilgisayarları ile sağlanamadığı görülmüştür. Bu uygulamalar izotermal ve tepkimesiz akışları içeren sistemlerden oluşmaktadır.

Geçtiğimiz yıl, bu projenin ilk basamağı olarak MOL'e dayalı laminar karışmasız tepkimeli iki boyutlu paralel Navier-Stokes doğrudan sayısal benzetişim (DNS) kodu geliştirilmiş, sonsuz kimyasal modeli kullanılarak kapalı, simetrik, kargasız, yayılan metan/hava alevindeki hız, sıcaklık ve bileşen profillerinin öngörülmesine uygulanmış ve deneylerle karşılaştırılarak makul sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Projenin bu yılı basamağını ise, yukarıda bahsi geçen yanma içeren sistemler için geliştirilmiş kodun düşük Reynolds sayılı türbülanslı karışmasız tepkimeli sisteme uygulanmasını kapsamaktadır. Bu uygulamayı gerçekleştirmeden önce, projenin ilk basamağında laminar karışmasız tepkimeli akışlar için geliştirilmiş olan paralel kodun performansının artırılmasına yönelik ilave çalışmalar yapılmıştır.

## **2.b) Gereç ve Yöntem:**

### **2.b.1) Alev Levhası Modeli:**

Yayılma tipi alevlerde, yanma hızı yakıt ve oksitleyicinin uygun oranlarda karışması ile kontrol edilir. Alev levhası modelinde, kimyasal tepkimeler tepkenlerin sonsuz hızla kararlı ürünlere dönüşmesine karşılık gelen tek aşamalı tersinmez bir tepkime ile ifade edilir. Bu tepkimenin, yakıt ve oksitleyicinin stokiyometrik oranlarda karıştığı, sıcaklık ve yanma ürünlerinin maksimuma ulaşığı çok ince isiveren bir bölgede gerçekleştiği varsayılar. Bu varsayımla yakıtın oksitleyici, oksitleyicinin de yakıt tarafında bulunamaması sonucunu doğurur. İhmal edilebilir ısıl yayını, sabit özgül ıslar ve Lewis sayısının bire eşit olma durumu varsayımları da göz önüne alındığında, enerji ve bileşen denklemleri matematiksel olarak birbirine benzer hale gelirler. Karışım-kesiri yaklaşımının yardımıyla, bu denklemler kaynaksız ulaşım-yayılım korunmuş skaler denklemi olarak bilinen tek bir denklem ile ifade edilir. Sıcaklık ve kararlı ürünler dağılımları, bu denklemin akış alan denklemleri ile birlikte çözülmesinden elde edilen sonuçlardan hesaplanırlar. Taşınım özellikleri, TRANSPORT paketi (KEE ve diğ., 1986), termodinamik özelliklerde CHEMKIN-III (KEE ve diğ., 1996) ve onun veri tabanı kullanılarak hesaplanmıştır.

### **2.b.2) Çizgiler Yöntemi ve ODE Çözüçüleri:**

Bu çalışmada, denklemler çizgiler yöntemi kullanılarak çözülür [SCHIESSEN, 1991]. Bu teknikte, kısmi diferansiyel denklemler (PDE) sistemi, stabil çözüm eldesini sağlayan beş noktalı Lagrange enterpolasyon polinomlu uzaysal ayrıklaştırma yöntemi kullanılarak sıradan diferansiyel denklem (ODE) ilk değer problemine çevrilir. Elde edilen bu ODE'lerin entegrali gelişmiş bir ODE çözümü kullanılarak alınır. Gelişmiş ODE çözümü, zaman ayrıklaştırma yükünü alır ve hem hassas hem de stabil çözüm sağlamak için zaman aralıklarını ve entegrale kullanılan metotun mertebesini ayarlar. Literatürde birçok hızlı ve güvenilir ODE çözümü bulunmaktadır. Burda önemli olan kodun uygulanacağı sisteme bağlı olarak hız ve stabilite açısından en uygun ODE çözümünün seçilmesidir. Bu amaçla, açık (explicit) "RKF45", yarı-örtük (semi-implicit) ROW metotlarına dayalı "ROWMAP", örtük (implicit) Adams-Moulton ve BDF metotlarını içeren "LSODE", "LSODES", "LSODA" ve "VODE" ODE çözüçüleri kargaşasız tepkimeli akışta test edilmiştir.

### **2.b.3) Paralel Uygulama:**

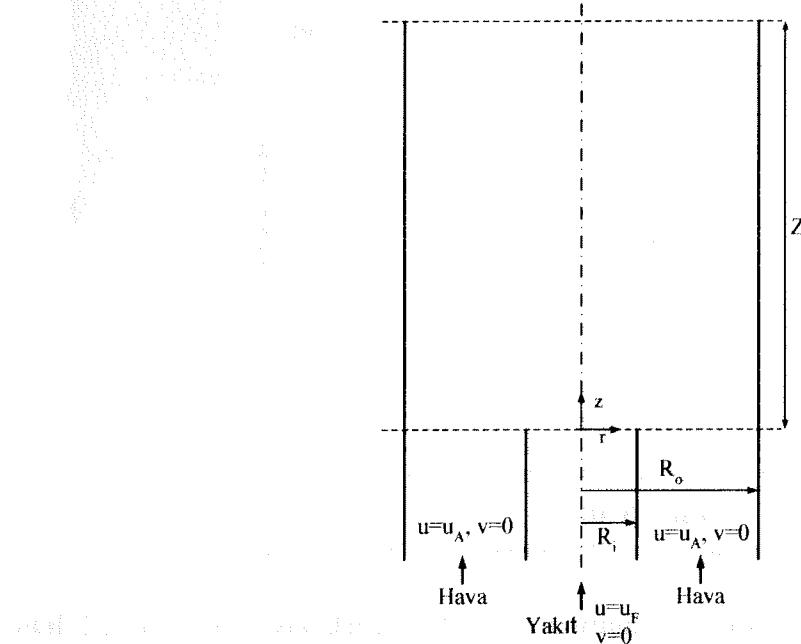
Bu çalışmada, çalışma süresini azaltmak ve daha fazla bilgisayar hafızası ihtiyacına çözüm getirebilmek için paralelleştirilmiş olan kodun performansının “yük dağılımı” (load balancing) yapılarak artırılması hedeflenmiştir. Paralel kodun çalışma davranışına dayalı statik yük dağılımı yaklaşımı kullanılarak yapılan bu işlemde paralel kod öncelikle tüm alt çözüm bölgelerinde eşit sayıda ağ dağılımı sağlanarak çalıştırılır. Her alt kümenin CPU zamanları incelenip, yüksek olduğu bölgelerde daha az grid kullanılarak paralel kod tekrar çalıştırılır ve her alt kümede harcanan CPU zamanları hemen hemen aynı düzeye getirilerek performans artışı elde edilir. Paralel kodda büyük problemleri küçük parçalara ayırmaya dayalı alan ayrıştırma (domain decomposition) tekniği, işlemciler arasında bilgi transferi için Parallel Virtual Machine (PVM) programı kullanılmaktadır.

### **2.c) Bulgular ve Tartışma:**

Projenin ilk basamağında laminar karışmasız tepkimeli akışlar için geliştirilmiş olan kod, projenin bu seneki hedefi olan düşük Reynolds sayılı türbülanslı karışmasız tepkimeli sisteme uygulanmasından önce performansının artırılması için yapılan çalışmalar “Laminar Tepkimeli Akış” başlığı altında, kodun türbülanslı karışmasız tepkimeli bir akışa uygulanması sonucu elde edilen bulgular “Türbülanslı Tepkimeli Akış” başlığı altında izah edilmiştir.

#### **2.c.1) Laminar Tepkimeli Akış:**

Seri ve paralel kodlar, daha önce deneysel olarak MITCHELL ve dig., (1980) tarafından çalışılmış olan, simetrik kargasız ortak akılı metan-hava yayılım alevinin öngörülmesine uygulandı. Bu yanma sistemi düşey silindirik bir yayılım alevi yakıcısı olup içlerinden yakıt ve oksitleyicinin geçtiği iç içe iki tüpden oluşmaktadır. Pyrex cam silindir ile kapatılmış olan sistemde, yakıt ve oksitleyicinin hızları durağan bir yayılım alevi oluşturacak şekilde ayarlanmıştır. Sistemin şematik gösterimi Şekil 2.1'de, geometrik parametreleri ve çalışma şartları Tablo 2.1'de verilmektedir. Hesaplamalar düzgün olmayan bir ağ dağılımıyla ( $121 \times 121$ ) yüksek değişimlerin olması beklenen bölgelerde daha fazla düğüm noktası kullanılarak yapılmıştır.



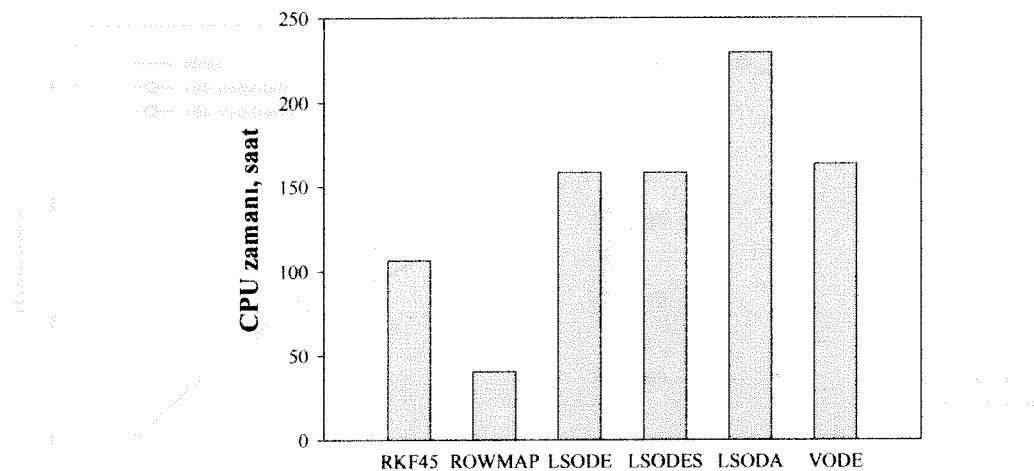
Şekil 2.1 Yayılım alevi yakıçısının şematik gösterimi.

### 2.c.1.1) ODE Çözücü Testi:

Kaliteli ODE çözüçüler stabil çözümler sağlamak kaydıyla değişken zaman aralıkları kullanacak şekilde geliştirilirler. Bunun için de göreceli hata toleransı (relative error tolerance)  $rtol$  ve mutlak hata toleransı (absolute error tolerance)  $atol$  seçimine gerek duyarlar. ODE çözüçülerini aynı şartlarda karşılaştırmak için hepsinde her iki tolerans değerleri  $10^{-3}$  olacak şekilde tanımlanmışlardır. Ancak bu tolerans değerleri RKF45 de sorun yaratmış olduğu için  $10^{-4}$  olarak kullanılmıştır.

Tablo 2.1 Laminar alev için geometrik parametreler ve sistemin çalışma şartları

Geometrik parametreler:	Sistemin çalışma şartları:	
$R_i = 0.635 \text{ cm}$	<b>İç Tüp (yakıt kısmı):</b>	<b>Dış Tüp (oksitleyici kısmı):</b>
$R_o = 2.54 \text{ cm}$	Eksenel giriş hız: $u_F = 4.5 \text{ cm/s}$	Eksenel giriş hız: $u_A = 9.88 \text{ cm/s}$
$Z = 30 \text{ cm}$	Radyal giriş hız: $v_F = 0.0 \text{ cm/s}$	Radyal giriş hız: $v_A = 0.0 \text{ cm/s}$
Sıcaklık: $T_F = 298 \text{ K}$		
Sıcaklık: $T_A = 298 \text{ K}$		
Duvar sıcaklığı 298 K'de sabit tutulmuştur.		



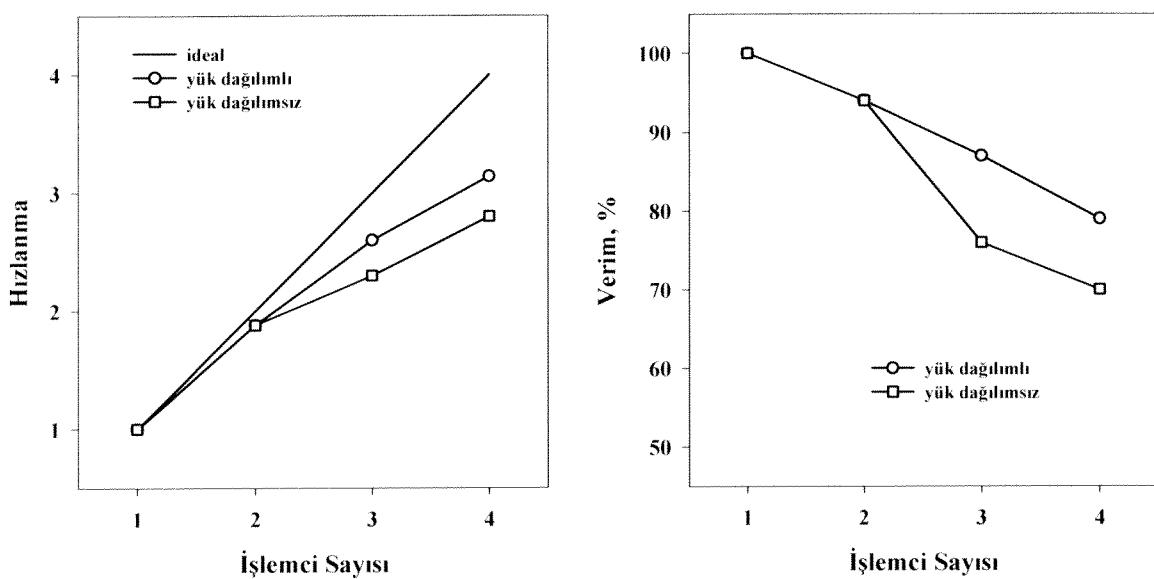
**Şekil 2.2 ODE çözüçülerin CPU zamanlarının karşılaştırılması.**

Şekil 2.2'de ODE çözüçülerin CPU zamanlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi ROWMAP en iyi performans gösteren ODE çözümü olmuş, RKF45'den 2.5 LSODE, LSODES ve VODE'den 4, LSODA dan ise 5.5 kat daha hızlı sonuca ulaşmıştır. Bu test sonucunda kodda zaman entegrasyonunda ROWMAP kullanılmaya karar verilmiştir. Aşağıda sunulan bütün sonuçlar ROWMAP ODE çözümü kullanılarak elde edilmiştir.

### 2.c.1.2) Seri ve Paralel Kodunu Performans Testi:

Seri ve paralel kodların performansları iki tane kriterin incelenmesiyle test edilmiştir. Bunlardan birisi “hızlanma” (speed-up) diğeri ise “verim” (efficiency) dir. Her iki programda aynı şartlar sağlanarak, yani aynı ağ dağılımı, zaman aralığı, bitiş zamanı ve hata toleransları kullanılarak test yapılmıştır. Paralel kodun çalışma davranışına dayalı statik yük dağılımı yaklaşımı kullanılarak performans artışı sağlanmaya çalışılmıştır. Kodlar 2 işlemcili 2 adet bilgisayarda çalıştırılmıştır. Bilgisayarlardan birisi 512 MB RAM'lı Pentium III-700 MHz diğeri ise 1024 MB RAM'lı Pentium III-1000 MHz olup 100 Mbps switch ile birbirlerine bağlıdır.

Şekil 2.3'de işlemci sayısının hızlanma ve verim üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Düz çizgi bütün işlemciler aynı olsaydı ve bilgi transferinde bir zaman kaybı olmasaydı elde edilmesi mümkün olan ideal durumu, daire simbolu yük dağılımlı durumda, kare simbolu ise yük dağılımsız durumda elde edilen hızlanmayı ve verimi göstermektedir. Şekillerden de anlaşıldığı gibi artan işlemci sayısı ile hızlanma artarken verim düşmekte, yük dağılımlı durumda hızlanma ve verim belli olduğu gibi daha yüksek olmaktadır. Ideal durumdan uzaklaşılma ve verimin düşme sebebi işlemci hızlarının farklı olması ve bilgi transferinin neden olduğu gecikmeler ile açıklanabilir.



Şekil 2.3 Hızlanma ve verimin işlemci sayısı ile değişimleri.

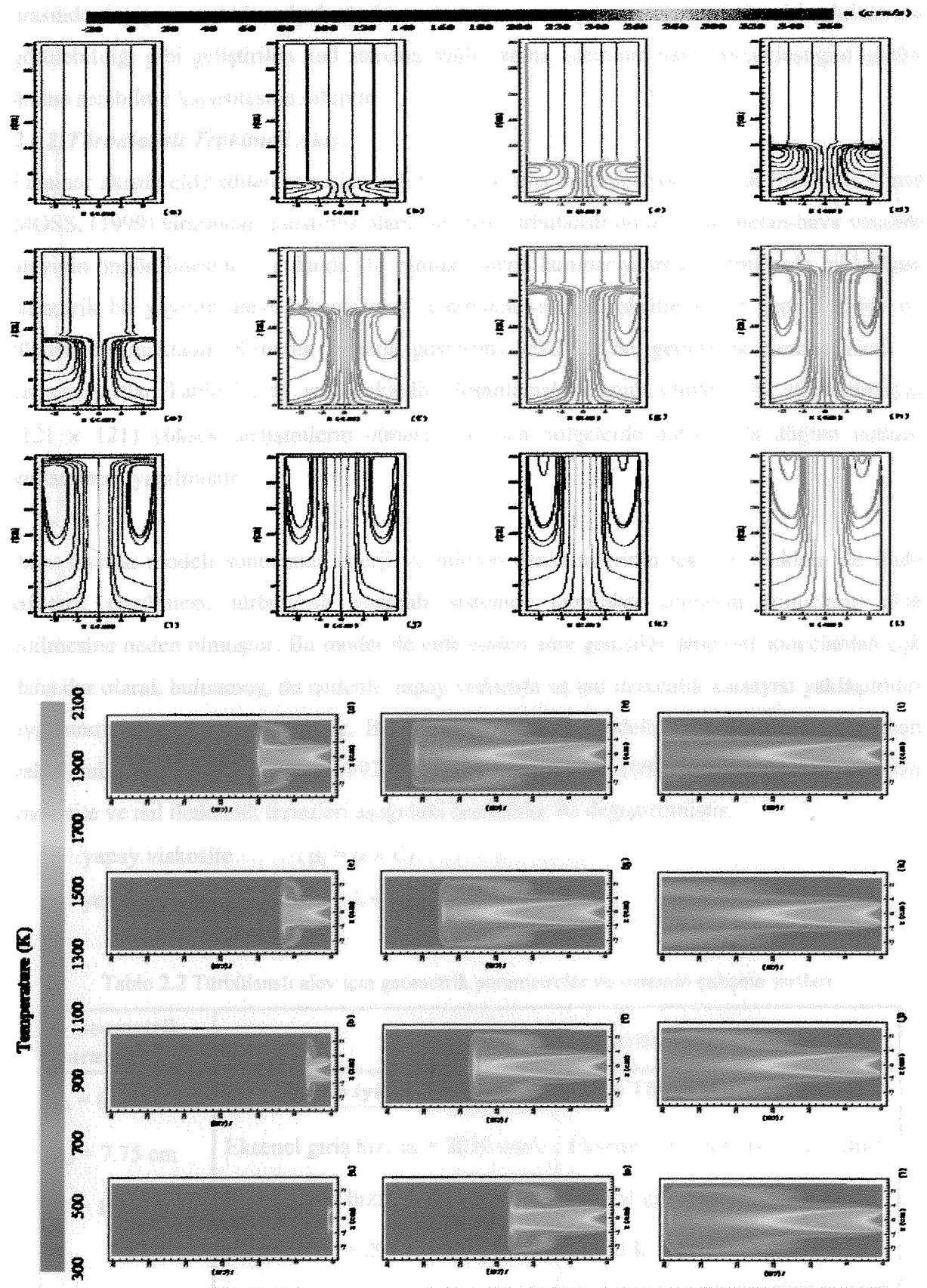
#### **2.c.1.3) Yatışkin Durum Sonuçları:**

Sıcaklıkların, bileşen kompozisyonlarının ve eksenel hızların radyal profilleri hesaplanarak üç farklı eksenel pozisyondaki deneyel veri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar projenin ilk yılı sonunda sunulan raporda verilmiştir, bu nedenle burda tekrar edilmeyecektir.

#### **2.c.1.4) Zamana Bağlı Sonuçlar:**

Hız, akış çizgileri ve sıcaklığın zamana bağlı sonuçları Şekil 2.4'de gösterilmektedir. Tüm sistem ilk başta oda sıcaklığında hava ile dolu olup, hızlar sıfıra eşitlenmiştir. Yakıt ve hava sisteme sokularak zamana bağlı çözüm başlatılır.

Şekil 2.4'ün üst kısmındaki renkli kontürler eksenel hız ve akım çizgilerinin zamanla değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi akış başlar başlamaz hızlar giriş bölgesinde sıcaklıkların artması nedeniyle artmaya ve duvar ile merkez arasında döngüler oluşmaya başlamaktadır. Zaman ilerledikçe, alev artan hızlarla çıkışa doğru ilerler ve büyük döngüler meydana gelir. Sistemde -50 cm/s ile 400 cm/s arasında değişen yüksek hız gradyanları oluşur. Durgun durumda döngüler son hallerine ulaşırlar. Şekil 2.4'ün alt kısmındaki renkli kontürler sıcaklığın zamanla değişimini göstermektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi akış başlar başlamaz yanma başlar ve hava ile yakıtın birleşme bölgelerinden itibaren sıcaklıklar yükseler ve alev genişler. Alev çıkışa doğru ilerledikçe yanma aşağı bölgelerde tamamlandığı için sıcaklıklar azalmaya başlar. Yatışkin duruma ulaşıldığında sisteme içinde yüksek sıcaklık farkları oluşur ve alev gerçek şeklini alır. 298 K ile 2000 K



**Şekil 2.4 Hız, akım çizgileri ve sıcaklığın zamana bağlı değişimleri; a) 10 ms, b) 50 ms, c) 100 ms, d) 150 ms, e) 200 ms, f) 280 ms, g) 340 ms, h) 400 ms, i) 450 ms, j) 500 ms, k) 750 ms, l) yataşkin durum.**

arasında değişen sıcaklık radyal yönde de hızlı bir azalış göstermektedir. Her iki şekilden de görülebildiği gibi geliştirilen kod zamana bağlı yanma işleminin nasıl gerçekleştiğini gözler önüne serebilme kapasitesine sahiptir.

### **2.c.2) Turbülanslı Tepkimeli Akış:**

Laminar akışda elde edilen sonuçlar ışığında, kod daha önce deneyel olarak BROOKES and MOSS, (1999) tarafından çalışılmış olan, simetrik turbülanslı ortak akışlı metan-hava yayılım alevinin öngörülmesine uygulandı. Bu yanma sistemi laminar yanma sistemindeki gibi düşey silindirik bir yayılım alevi yakıcısı olup içlerinden yakıt ve oksitleyicinin geçtiği iç içe iki tüpden oluşmaktadır. Sistemin şematik gösterimi Şekil 2.1'de, geometrik parametreleri ve çalışma şartları Tablo 2.2'de verilmektedir. Hesaplamalar düzgün olmayan bir ağ dağılımıyla ( $121 \times 121$ ) yüksek değişimlerin olması beklenen bölgelerde daha fazla düğüm noktası kullanılarak yapılmıştır.

Alev levhası modeli sonucunda enerji ve bileşen denklemlerinin tek bir denklem ile ifade edilerek çözülmesi, turbülanslı yanmalı sistemde taminkar olmayan sonuçların elde edilmesine neden olmuştur. Bu model ile elde edilen alev genişliği deneyel sonuçlardan çok daha dar olarak bulunmuş, bu nedenle yapay viskosite ve ıslı iletkenlik katsayıları yaklaşımı uygulanması gerekliliği bulunmuştur. Bu amaçla turbülans modellerinde de sıkça uygulanan yaklaşımla (MAHAJAN ve diğ., 1993; TURKEL ve VATSA, 1994) denklemlerde kullanılan viskosite ve ıslı iletkenlik terimleri aşağıdaki denklikler ile değiştirilmiştir.

$$\text{Yapay viskosite : } \mu_t = \mu \times C_1$$

$$\text{Yapay ıslı iletkenlik : } \lambda_t = \lambda + \mu_t \times C_p \times C_2$$

Tablo 2.2 Turbülanslı alev için geometrik parametreler ve sistemin çalışma şartları

<b>Geometrik parametreler:</b>	<b>Sistemin çalışma şartları:</b>	
$R_i = 0.2035 \text{ cm}$	<b>İç Tüp (yakıt kısmı):</b>	<b>Dış Tüp (oksitleyici kısmı):</b>
$R_o = 7.75 \text{ cm}$	Eksenel giriş hız: $u_F = 2030 \text{ cm/s}$	Eksenel giriş hız: $u_A = 52.2 \text{ cm/s}$
$Z = 100 \text{ cm}$	Radyal giriş hız: $v_F = 0.0 \text{ cm/s}$ Sıcaklık: $T_F = 290 \text{ K}$	Radyal giriş hız: $v_A = 0.0 \text{ cm/s}$ Sıcaklık: $T_A = 290 \text{ K}$

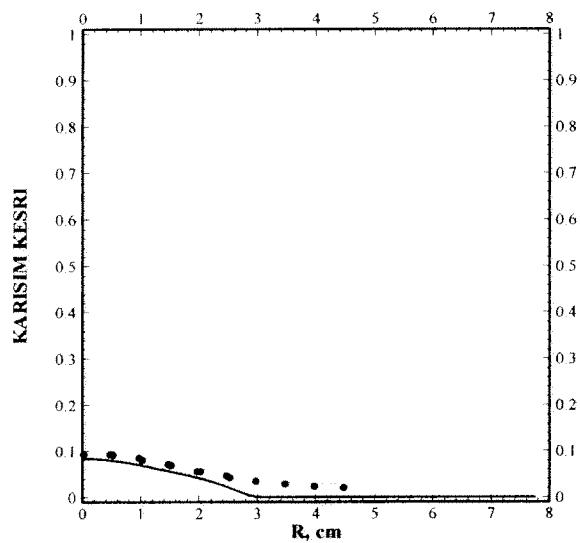
Bu denkliklerdeki  $\mu$  viskosite,  $\lambda$  ısil iletkenlik,  $C_p$  özgül ısi,  $C_1$  ve  $C_2$  ise ayarlanabilir katsayılardır.  $C_1$  ve  $C_2$  parametrelerini değiştirmek kaydıyla kodun çözümleri ile deneysel sonuçların mümkün olduğunda birbirlerine uyması için bir parametrik çalışma yapılmış ve en uygun katsayıların  $C_1 = 50$  ve  $C_2 = 0.02$  olduğu bulunmuştur. Bu katsayılar ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

#### **2.c.2.1) Karışım Kesri Dağılımları:**

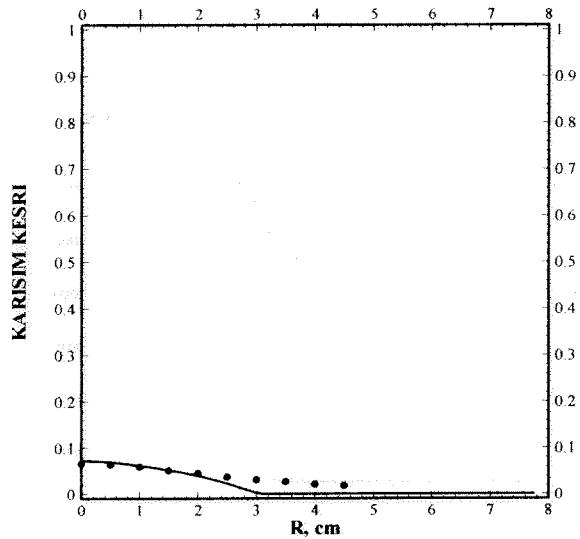
Şekil 2.5-2.7'de, iki farklı eksenel konumdaki ve merkez çizgisindeki karışım kesri dağılımları görülmektedir. Çizgiler kodla elde edilen öngörümleri, semboller ise deneysel verileri göstermektedir. Her üç şekilden de anlaşıldığı gibi kodun karışım kesri öngörümleri deneysel verilerle genel olarak uyum içinde olmakla birlikte, kodun öngörümleri yakıcının giriş bölgesinde deneysel verilerden daha yüksek ilerleyen bölgelerde ise daha düşük olduğu görülmektedir. Kinetik kontrollü tepkime sistemlerine nazaran oldukça basit olan alev levhası modelinin bir sonucu bu farklılık olmasına rağmen, alev hakkında oldukça iyi bir fikir elde edilebilmektedir.

#### **2.c.2.2) Sıcaklık Dağılımları:**

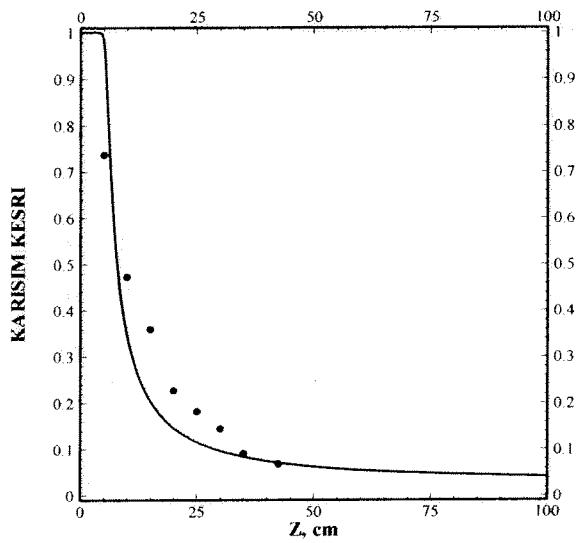
Şekil 2.8-2.10'da, iki farklı eksenel konumdaki ve merkez çizgisindeki sıcaklıkların dağılımları görülmektedir. Çizgiler kodla elde edilen öngörümleri, semboller ise deneysel verileri göstermektedir. Her üç şekilden de anlaşıldığı gibi kodun sıcaklık öngörümleri deneysel verilerle aynı davranış göstermesine rağmen, alevin genişliğini yakalayamamaktadır. Kodun sıcaklık öngörümleri yakıcının giriş bölgesinde deneysel verilerden daha düşük, ilerleyen bölgelerde ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu uyumsuzluklar alev levhası modelinden kaynaklanmaktadır, ancak alev hakkında yaklaşık bir bilgi sağlamaktadır.



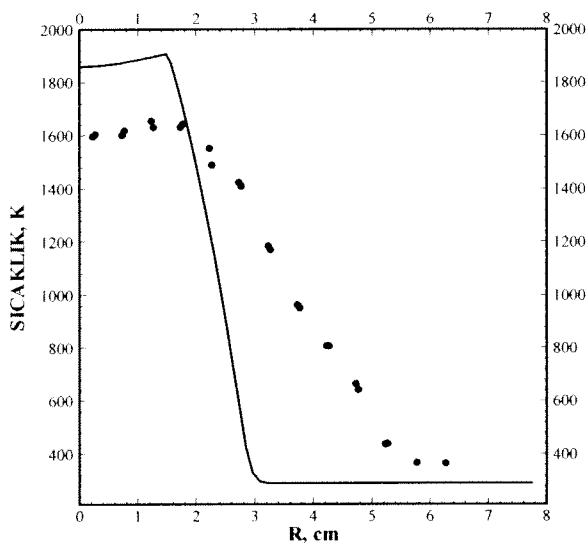
Şekil 2.5  $z = 35$  cm'deki karışım kesrinin radyal dağılımı; çizgi: öngörüler, simbol: deneyel veri.



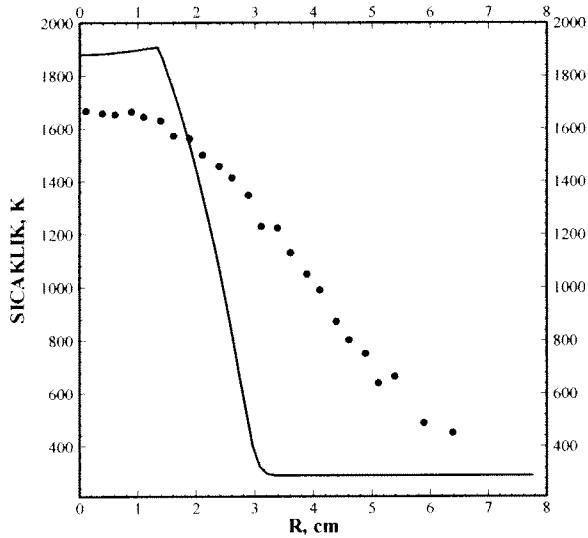
Şekil 2.6  $z = 42.5$  cm'deki karışım kesrinin radyal dağılımı; çizgi: öngörüler, simbol: deneyel veri.



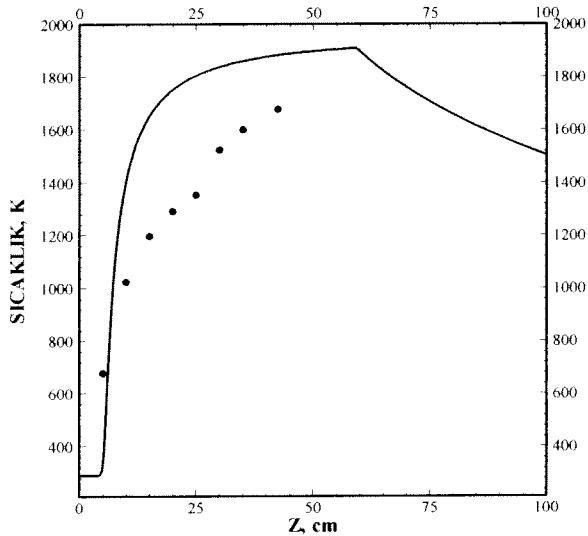
Şekil 2.7 Simetri eksenindeki karışım kesrinin dağılımı; çizgi: öngörüler, simbol: deneyel veri.



Şekil 2.8  $z = 35 \text{ cm}$ 'deki sıcaklık radyal dağılımı; çizgi: öngörüler, simbol: deneyel veri.



Şekil 2.9  $z = 42.5 \text{ cm}$ 'deki sıcaklık radyal dağılımı; çizgi: öngörüler, simbol: deneyel veri.



Şekil 2.10 Simetri eksenindeki sıcaklık dağılımı; çizgi: öngörüler, simbol: deneyel veri.

## **2.d) Sonuç:**

Proje kapsamında geliştirilmiş olan çizgiler yöntemine dayalı alev levhası modeli içeren kodun laminar ve türbülanslı alev simülasyonlarında makul sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak, daha hassas çözümler için detaylı kimyasal tepkime modellerinin koda eklenmesi gereği tespit edilmiştir. Alev levhası modeli çözümü, detaylı kimyasal tepkime modelleri kullanılarak elde edilecek çözümlerde başlangıç çözüm tahminleri olarak kullanılacak ve bu sayede modellerin geliştirilmesi ve hesaplama için gereken zamanlarda önemli azalmalar sağlanacaktır.

Çalışma, proje öneri formunda belirtilen amaç ve kapsama uygun olarak sonuçlanmıştır. Bu proje kapsamında geliştirilmiş olan kod, çizgiler yöntemine dayalı Navier-Stokes çözümünün yanma sistemine uygulanan ilk örneğidir.

Projenin ilk basamında elde edilen sonuçlar ile bu proje kapsamında laminar tepkimeli akış için elde edilen sonuçlar “Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences” dergisinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir (TARHAN ve SELÇUK, 2003).

## **2.e) Kaynakça:**

BROOKES, S. J., Moss J. B., “Measurements of Soot Production and Thermal Radiation From Confined Turbulent Jet Diffusion Flames of Methane”, *Combust. Flame*, 116, 49-61, (1999).

KEE, R. J., Dixon-Lewis, G., Warnatz, J., Coltrin, M. E., Miller, J. A., “A FORTRAN computer code package for the evaluation of gas-phase, multicomponent transport properties”, Technical Report SAND86-8246, Sandia National Laboratories, (1986).

KEE, R. J., Rupley, F. M., Meeks, E., Miller, J. A., “CHEMKIN-III: A FORTRAN chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical and plasma kinetics”, Technical Report SAND96-8216, Sandia National Laboratories, (1996).

MAHAJAN, A. J., Dowell, E. H. and Bliss, D. B. , “Role of Artificial Viscosity in Euler and Navier-Stokes Solvers”, *AIAA Journal*, 429 555-559, (1993).

MITCHELL, R. E., Sarofim, A. F., Clomburg, L. A., "Experimental and Numerical Investigation of Confined Laminar Diffusion Flames", *Combust. Flame*, 37, 227–244, (1980).

OYMAK, O. "Method of Lines Solution of Time-Dependent 2D Navier-Stokes Equations for Incompressible Separated Flows", (Ph.D. Thesis), Chemical Engineering Department, Middle East Technical University, (1997).

SCHIESSER, W. E., *The Numerical Method of Lines: Integration of Partial Differential Equations*. Academic Press, New York (1991).

SELÇUK, N., Oymak, O., "A Novel Code for the Prediction of Transient Flow Field in a Gas Turbine Combustor Simulator", NATO/RTO Meeting Proceedings 14, AVT Symposium on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels, (1999).

TARHAN, T, Selçuk, N., "Numerical Simulation of Confined Methane/Air Laminar Diffusion Flame by Method of Lines", Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, (2003) (accepted for publication).

TURKEL, E., Vatsa, V. N., "Effect of artificial viscosity on three-dimensional flow solutions", *AIAA Journal*, 32, 39-45, (1994).

**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**Proje Kodu: : **MİSAG-CNRS-1**

Proje Başlığı:

**Yakıtça Fakir, Ön Karışımı ve Gazlaştırılmış Kargaşalı Püskürtmeli Yanmanın Sayısal Benzetisimi****(Numerical Simulation of Lean Premixed and Prevaporised Turbulent Spray Combustion)**

Proje Yürüttüctüsü ve Yardımcı Araştırmacılar:

**Prof. Dr. Nevin Selçuk, Prof. Dr. Sinan Akmandor, Araş. Gör. Tanıl Tarhan**

Projenin Yürüttüğü Kuruluş ve Adresi:

**Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Kimya Mühendisliği Bölümleri**

**Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Kimya Mühendisliği Bölümü  
06531 Ankara Türkiye**

Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:

**TÜBİTAK Atatürk Bulvarı No:221, Kavaklıdere, 06100, Ankara****CNRS LCSR, 1C, Av. de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans cedex 2**Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: **01 Ocak 2002 - 30 Nisan 2003**

Öz

**Püskürtmeli heptan-hava, fakir karışımı, tepkimeli akımın sayısal benzeşimi yapılmıştır.** Çalışmada birinci amaç, **yakit taneciklerinin izlediği yol ile yol boyunca taneciklerinin boyutlarındaki değişiklikleri hesaplamaktır.** İkinci amaç ise, buharlaşma ile sıvı yakıt-hava karışım olaylarını yatkın durum için incelemektir. Problem geometrisi, eş eksenel, değişik çapta ve uzunluktaki 3 borunun, silindirik bir yanma odasına açılmalardan oluşmaktadır. En içteki boru sıvı heptan yakıtını, onun etrafındaki boru püskürtme havasını, en dıştaki boru ise yanma havasını taşımaktadır. Buharlaşmayı ve karışmayı etkileyen başlıca etkenler arasında, noktasal sıcaklık değerleri, her üç akımının giriş hızları ve basınç değerleri, girişteki yakıt tanecik yoğunluğu ve boyut dağılımları olduğu görülmüştür.

Projenin ilk yılında geliştirilmiş olan çizgiler yöntemine dayalı laminar karışmasız tepkimeli iki boyutlu zamana bağlı paralel Navier-Stokes doğrudan sayısal benzetisim (DNS) kodun performansının artırılmasına yönelik ilave çalışmalar yapılmış, kapalı eksenel simetriye sahip laminar metan-hava yakıcısına uygulanarak test edilmiştir. Performans artışının tespitini takiben, kod düşük Reynolds sayılı türbülanslı simetrik ortak aaklı metan-hava yayılım alevinin öngörülmesine uygulanmıştır. Sıcaklık ve karışım kesri öngörümleri deneySEL verilerle karşılaştırılarak kodun makul sonuçlar verdiği görülmüştür. Daha hassas çözümler için detaylı kimyasal tepkime modellerinin koda eklenmesi gereği tespit edilmiştir. Kodda kullanılan alev levhası modeli ile elde edilen çözümler, detaylı kimyasal tepkime modellerinin geliştirilmesi ve hesaplamalar için gereken zamanlarda önemli azalmalar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler:

**Sıvı-gaz Navier Stokes çözümüsü, fakir karışımı yakıt püskürtmesi, yayılım alevi, çizgiler yöntemi, alev levhası modeli, türbülans, paralel hesaplama**

Projeden Kaynaklanan Yayınlar:

**Tanıl Tarhan and Nevin Selçuk, "Numerical Simulation of Confined Methane/Air Laminar Diffusion Flame by Method of Lines", Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences (basıma kabul edildi).****Bilim Dalı: 912 ve 910****Doçentlik Bilim Dalı Kodu: 1.038 ve 1.002**