

**DÜŞEY BİR GÖZENEKLİ KANALDA YANMANIN
SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tanju ERGEN

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Cihat BAYTAŞ

HAZİRAN, 2016

**DÜŞEY BİR GÖZENEKLİ KANALDA YANMANIN
SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tanju ERGEN
(514131012)**

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Cihat BAYTAŞ

HAZİRAN, 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 514131012 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Tanju ERGEN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DÜŞEY BİR GÖZENEKLİ KANALDA YANMANIN SAYISAL İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. A. Cihat BAYTAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ahmet Cihat Baytaş**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. Ali Pınarbaşı
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Onur Tunçer
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02 Mayıs 2016**
Savunma Tarihi : **13 Haziran 2016**

Hayatta en hakiki mürşit ilimdir., M. K. ATATÜRK

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının konusu, gözenekli ortamda yanma olayının sayısal olarak iki boyutta incelenmesidir. Son yıllarda gözenekli yakıcılar ile ilgili çalışmalar artmıştır, çünkü geleneksel yakıcılar ile karşılaştırıldığında, gözenekli yakıcıların üstün olduğu önemli özellikleri vardır. Bu özellikleri kısaca, yüksek güç yoğunluğu sağlamak, düşük oranda gaz salımları yapmak ve yüksek yanma verimi ile çalışmak gibi başlıklar ile özetleyebiliriz. Tez çalışmamda yanma, ön karışimsız olacak şekilde metan ve hava için flamelet yaklaşımı ile modellenmiştir. Kanal içerisinde gözenekliliği oluşturan malzeme olarak düşük yoğunluğa ve yüksek ısı iletkenliğe sahip silikon karbid seçilmiştir. Katı ve gaz fazları arasında ısı dengenin olmayacağı göz önünde bulundurularak, sayısal çalışmamızda her fazın sıcaklıkları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Sonuç olarak literatürde daha önce uygulamasına rastlamadığımız gözenekli ortam için yanmanın flamelet yaklaşımı ile modellenmesi başarılmıştır. Bu model ile yanmanın kimyası önişlem olarak çözölüp, tablo haline getirilerek çok karışık yanma mekanizmaları için hesaplama süresinde önemli oranda bir azalma sağlanır.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, iki yıl boyunca değerli bilgilerini bizlerle paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım saygı değer hocalarım; Prof. Dr. A. Cihat Baytaş ve Doç. Dr. Onur Tunçer'e, eğitim hayatım boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TUBİTAK tarafından “114M672” no’lu proje kapsamında desteklenmektedir. Desteklerinden dolayı TUBİTAK’a teşekkür ederiz.

Haziran, 2016

Tanju ERGEN
(Araştırma Görevlisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Hipotez	4
2. GÖZENEKLİ ORTAM.....	7
2.1 Gözenekli Ortam Nedir?.....	7
2.2 Gözenekli Ortamda Yanma Olayı.....	8
2.3 Kullanım Alanları	11
3. YANMA MODELİ.....	13
3.1 Laminar Flamelet Model	13
3.1.1 Laminar flamelet model korunum denklemleri	14
3.1.2 Adyabatik olmayan koşullar için tabloların oluşturulması.....	15
3.1.3 GRI 3.0 mekanizması	18
4. SAYISAL ÇÖZÜM.....	19
4.1 Matematik Model	20
4.1.1 Sınır koşulları	23
4.1.2 Kanal ve akışkan özellikleri	23
4.1.3 Çözüm ağı oluşturma.....	27
4.2 SIMPLE Algoritması.....	27
4.2.1 Sonlu hacimler yöntemi.....	29
4.2.2 Denklemlerin ayrıklaştırılması	30
4.2.3 Basınç düzeltmesi	34
5. SONUÇ ve TARTIŞMA	39
5.1 Sonuç	53
KAYNAKLAR.....	55
EKLER	59
EK A.1	61
EK A.2	105

EK A.3	107
EK A.4	109
EK A.5	119
ÖZGEÇMİŞ	123

KISALTMALAR

ADI	: Alternating Direction Implicit
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği
PPC	: Por Per Centimeter
SCRS	: Simple Chemical Reaction System
SHY	: Sonlu Hacimler Yöntemi
SIMPLE	: Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
TDMA	: Tri-diagonal Matris Algoritması
NASA	: National Aeronautics and Space Administration

SEMBOLLER

a_1, a_2, a_3, a_4	: NASA Polinom Katsayıları
C	: Korelasyon Katsayısı
c_p	: Sabit Basıncıta Isıl Kapasite
c_v	: Sabit Hacimde Isıl Kapasite
D	: Kütle Yayılımı
d_p	: Gözeneklilik Çapı
H	: Entalpi
h_i	: Özgül Entalpi
h_v	: Hacimsel Isı Taşınım Katsayısı
h_1, h_2, h_3	: Kanal Boyutları
K	: Geçirgenlik
k	: Isıl iletkenlik
k_B	: Boltzmann Sabiti
Le	: Lewis Sayısı
M	: Mol Kütlesi
m	: Korelasyon Katsayısı
Nu	: Nusselt Sayısı
P	: Basıncı
Pe	: Peclet Sayısı
R	: Gaz Sabiti
Pr	: Prandtl Sayısı
Re	: Reynolds Sayısı
S_L	: Laminer Alev Hızı
T	: Sıcaklık
T_e^*	: İndirgenmiş Sıcaklık
u	: x ekseni hız bileşeni
v	: y ekseni hız bileşeni
Q	: Isı
Y	: Kütle Kesiri
Z	: Karışım Kesiri
t	: Zaman
α	: Isıl Yayılım
ϵ	: Gözeneklilik
ρ	: Yoğunluk
χ	: Scaler Dağılım Oranı
μ	: Dinamik Viskozite
ξ	: Entalpi Noksanlığı
σ_a	: Çarpışma Çapı
ϵ_a	: Lenard-Jones Potansiyeli
$\Omega^{(2,2)}$	: Çarpışma İntegrali
γ	: Isıl Kapasiteler Oranı
λ	: Akış Yatağı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Günlük hayattan bazı malzemelerin geçirgenlikleri [19].	8
Çizelge 2.2: Bazı gözenekli ortam malzemelerinin termofiziksel özellikleri [21]. ..	10
Çizelge 4.1: Flamelet tabloları için sınır koşulları.	23
Çizelge 4.2: Gözenekli Ortam Özellikleri.	24
Çizelge 4.3: Polinom katsayıları [25].	26
Çizelge 5.1: Avrupa gaz emisyon standartları [41].	52

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Gözenekli ortamda yanma [16].	4
Şekil 2.1 : Çeşitli gözenekli ortam örnekleri [22].	10
Şekil 3.1 : Ters akışlı difüzyon alevi [23].	14
Şekil 3.2 : Adyabatik koşullarda (Entalpi noksanlığı sıfıra eşit iken) oluşturulmuş flamelet tablosu.	16
Şekil 3.3 : Pozitif entalpi noksanlığında oluşturulmuş flamelet tablosu.	17
Şekil 3.4 : negatif entalpi noksanlığında oluşturulmuş flamelet tablosu.	17
Şekil 4.1 : Problemin şematik gösterimi.	19
Şekil 4.2 : Katı faz için özısının sıcaklık ile değişimi [29].	24
Şekil 4.3 : Katı faz için ısı iletim katsayısının sıcaklık ile değişimi [29].	24
Şekil 4.4 : Çözüm ağı oluşturma yöntemleri.	27
Şekil 4.5 : Problemimizin Çözüm Algoritması.	28
Şekil 4.6 : İki boyutlu bir problem için denetim hacmi ve ağ yapısı.	29
Şekil 4.7 : Farklı şemalar için A(IP) fonksiyonu [35].	34
Şekil 5.1 : Farklı sayıda hacim içeren çözüm ağları için kanal ortasında sıcaklığın değişimi.	39
Şekil 5.2 : Kanalin orta noktasındaki sıcaklık değerinin zamanla değişimi.	40
Şekil 5.3 : Kanal içerisinde hız vektörleri.	41
Şekil 5.4 : Kanal içerisinde karışım kesrinin dağılımı.	42
Şekil 5.5 : Kanal içerisinde gaz sıcaklığının dağılımı.	43
Şekil 5.6 : Kanal içerisinde katı sıcaklığının dağılımı.	44
Şekil 5.7 : Kanalin ortasında dikey ekseninde gaz ve katı faz sıcaklıkları.	45
Şekil 5.8 : Kanalin içerisinde soldan sağa CH_4 ve O_2 dağılımı.	46
Şekil 5.9 : Kanalin içerisinde soldan sağa CO ve CO_2 dağılımı.	47
Şekil 5.10 : Kanalin içerisinde soldan sağa H_2O ve N_2 dağılımı.	47
Şekil 5.11 : Kanalin içerisinde soldan sağa NO ve NO_2 dağılımı.	48
Şekil 5.12 : Kanalin ortasında dikey yönde belirli türlerin dağılımı.	49
Şekil 5.13 : Kanalin ortasında dikey yönde NO ve CO kütle kesri dağılımları (ppm).	50
Şekil 5.14 : Farklı hava fazlalığı oranları için kanal ortasında düşey yönde gaz sıcaklığının dağılımı.	51
Şekil 5.15 : Farklı hava fazlalığı oranları için gözenekli yakıcının NO emisyonu.	52

DÜŞEY BİR GÖZENEKLİ KANALDA YANMANIN SAYISAL İNCELENMESİ

ÖZET

Gözenekli yakıcıların serbest alevli yakıcılara göre yüksek yanma verimi ve yüksek güç yoğunluğu sağlama ile daha düşük seviyede gaz salım oranına sahip olmak gibi üstün özellikleri vardır. Bu avantajları bulundurmamasından dolayı hem sayısal hem deneysel birçok çalışma gözenekli yakıcıların gaz salımlarını, çalışma limitlerini ve ısı verimlerini incelemek için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı düşey iki boyutlu, eşdeğer gözenek çapları farklı üç bölgeden oluşan, gözenekli bir kanalda yanmanın sayısal olarak ısıl dengesiz model ile incelenmesidir. Gözenekli yakıcı için yapılan çalışmalar ikiye ayrılmıştır. Bunların birincisi, gözenekli kanalın ısıl dengesiz enerji denklemleri ile incelenmesidir. Kanal ısıl dengesiz olarak kabul edilmiştir, çünkü yanma esnasında katı ve gaz fazları arasında yüksek sıcaklık farkı oluşacaktır. Gözenekli kanal içerisinde tüm hız, sıcaklık ve tür alanları SIMPLE algoritması tabanlı geliştirilen bilgisayar programı ile hesaplanmaktadır. Çalışmadaki ikinci bölüm ise gaz fazı içerisinde yanmanın Laminar Flamelet Yaklaşımı ve GRI 3.0 mekanizması (53 Tür, 325 Reaksiyon) ile modellendiği kısımdır. Kanal içerisinde katı fazı için silikon karbid (SiC) kullanmıştır. Problemimizde, düşey kanal farklı gözenek çaplarına sahip art arda sıralanmış üç bölümden oluşurken, katı fazın ve gaz fazının öz ısı, ısıl iletkenlik ve viskozite gibi özellikleri sıcaklığa bağlı olarak kullanılmıştır. Çalışmamızda ilk adım olarak hesaplamalara başlamadan önce, laminar flamelet denklemlerinin adyabatik olmayan koşullarda hep pozitif hem negatif çeşitli entalpi noksanlıklarında çözülmesiyle modelimiz için gerekli flamelet çizelgeleri oluşturulmuştur. Bu çizelgelerde gaz sıcaklığı ve türlerin gaz karışımı içerisindeki kesirlerinin yanı sıra gaz karışımının yoğunluk ve öz ısı gibi bilgileri de yer almaktadır. Laminar flamelet yaklaşımında bahsedilen tüm bu bilgiler, karışım kesri ve gaz enerjisi denklemleri çözülerek, karışım kesri, skaler dağılım oranı ve entalpi noksanlığı değişkenlerinin hesaplanmasıyla ön işlemde hazırladığımız çizelgelerde üç boyutlu ara bulma yapılarak bulunur. Gözenekli yakıcıların gaz emisyonları ile ilgili avantajlarından sıkça söz edilmektedir, bu yüzden çalışmamızda kanal içerisinde NO ve CO salımlarının değişimine yer verilmiştir. Gözenekli yakıcıların bir diğer avantajı kanal içerisinde katı matris yardımı ile açığa çıkan tepkime enerjinin bir bölümünün yanmamış gazlara kazandırılması ile gaz karışımının sıcaklığının tepkime öncese bir miktar yükselmesi ve bu sayede yanma limitlerinin artırılmasıdır. Bu konu ile ilgili gözenekli yakıcıda farklı hava fazlalığı oranları için çözümler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yakıcı kanal içerisinde hız, sıcaklık ve tür kesirlerinin dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kararlı hal için verilmiş ve bu sonuçların çözüm açısından bağımsız olduğu gösterilmiştir. Gözenekli yakıcılarda Laminar flamelet yaklaşımı çok yeni bir konudur. Bu yaklaşım ile bulduğumuz sonuçlar literatürde farklı hem deneysel hem sayısal çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile bu yaklaşımın gözenekli yakıcılar için uygulanabileceği ve son derece verimli bir yanmanın elde edilebileceği gösterilmiştir.

INVESTIGATION OF COMBUSTION IN A VERTICAL POROUS MEDIA

SUMMARY

Porous burners has superior technological features against free flame burners such as high combustion efficiency, providing high power density and low emission of pollutant gases. Due to these advantages, it is a popular topic among researchers nowadays. Many numerical and experimental studies are conducted to investigate pollutant emissions, operating limits and thermal efficiency of porous burners. Purpose of this study is to investigate combustion inside a porous channel that has three regions with different equivalent pore diameters in two dimension. Equivalent pore diameter should be chosen carefully because stability of combustion in porous media depends on the modified Peclet number. Stable combustion occurs only when modified Peclet number is over 65. Porous burners provides feedback of heat from burnt gases to unburned gases. First region of the channel is designed to have modified peclet number less than 65 so that flame cannot propagate here. Second regions is where the combustion occurs. Heat released from burnt gases transferred to solid matrix and by conduction, heat is diffusing to first region to increase unburned gas temperature. Increasing the temperature of unburnt gases allows ultra-lean combustion regimes. This is how feedback mechanism works in porous burners.

In this study, Numerical analysis for porous burner are divided by two parts. First part is investigating the porous channel with non-equilibrium energy equations. Since temperature difference will be recognizably high during combustion, we can't assume that gas and solid temperatures will be the same. For this reason, two different energy equation is solved for gas and solid phase. While high temperature resistant ceramic foam inside the channel represents the porous burner, methane and air is used as fuel and oxidizer. Thermophysical properties of both solid and gas are not taken constant, they are all dependent on temperature. Heat capacity and density of gas mixture is found from flamelet tables and thermal conductivity and viscosity of gas mixture is calculated using Lennard-Jones parameters while heat capacity and thermal conductivity of solid is taken from an experimental study.

Second part is to model combustion in porous media with flamelet approach using GRI 3.0 mechanism (53 species, 325 reactions). Before calculations, laminar flamelet tables are constructed by solving flamelet equations for non-adiabatic conditions as pre-process. In flamelet approach, gas temperature is determined by three-dimensional interpolation with mixture fraction, scalar dissipation rate and enthalpy defect values. This approach does not includes combustion chemistry to calculations. For complex combustion mechanisms, this is an great advantage for computation time.

Governing equations are discretized with finite volume method and the computation is executed by SIMPLE Algorithm based in-house code written in FORTRAN language. Computational domain is divided into small control volumes, all with the same size.

This is the basic outline of the code; After giving initial condition to all variables in the computation zone, first momentum and continuity equations for porous media are solved to obtain velocity field in the channel. Then Mixture fraction equation is solved to find gas temperature distribution and to calculate scalar dissipation rate. Later gas energy equation is solved to calculate enthalpy defect. As the last equation solid energy is solved to obtain solid temperature distribution in the channel and all thermophysical properties are updated according to temperature. That would be end of the loop for one time step, and this loop will continue until steady-state solution is found.

It was mentioned that porous channel has three regions. As dimensions, First region (h_1) is 5cm long, second region (h_2) is 10cm long and third region (h_3) is 15cm long, while width of the channel is 10cm.

Three different mesh size is compared with each other to prove that code works independent of mesh size. These computational domains; 52x102, 104x204 and 156x306. Temperature distribution on a vertical line at the middle of the channel is compared relative to computational domain with smallest mesh size. Results shows us that error of domain with the largest mesh size to domain with the smallest mesh size is around 7.85 and error of the other domain to domain with smallest mesh size is around 2.5. As a result, mesh size of 104x204 domain found to be sufficient enough.

At the middle point of the channel, both gas and solid temperature is observed during calculation. After program stops running, temperature values over time of that point shows us that this is the steady state solution since temperature values stay constant after a certain time.

Velocity distribution is presented in results. Velocity profile differs from open channel flow, meaning that permeability plays dominant role in momentum equation.

Temperature distributions shows us that feedback of heat is achieved solving two different energy equation for flamelet approach. Temperature is diffused to first solid region from second with conduction term in solid energy equation and temperature of unburned gases are increased with convection term in gas energy equation. Temperature distribution on a vertical line at the middle of the channel is also compared with a similar study in literature conducted by Farzaneh in 2012. In this study, porous channel is also consist of three different regions. Purpose of first two is same with ours; mixing region and combustion region. Third region of that study consist of heat exchangers. This explains the dramatic temperature drop in that region.

Fractions of species can be found same as the gas temperature from flamelet table with three dimensional interpolation using mixture fraction, scalar dissipation rate and enthalpy defect. Major species fraction are found in each iteration since they are used to calculate thermal conductivity and viscosity of gas mixture. Rest of the species can be found in post-processing if those three necessary parameters are saved.

Feedback of chemical reaction energy to unburnt gases via conduction in solid matrix, raises gas mixture temperature before combustion. This feedback mechanism increase flammability limits for lean mixture. In our study, results are presented for three different excess air ratios. Since the energy from chemical reaction is kept the same, exit temperature of the burner decreased with higher excess air ratio. Although exit temperature changes in burner for different excess air ratios, maximum temperature in the channel is not effected by the excess air ratio since our problem

solves non-premixed combustion where combustion always occurs in stoichiometric conditions at the flame front.

Gas emissions are said to be one of the advantages of porous burners. In this study, gas emission of NO and CO is also studied and production of these species are shown in the middle of the channel. Gas emission are compared with different excess air ratios as they are compared with a different study as well. After seeing results, it can be said that NO and CO emissions is highly related with temperature especially flame front temperature and exit temperature. Since increasing excess air ratio, decreases exit temperature, as expected NO emission is decreased with higher excess air ratio.

In conclusion, combustion is modeled with flamelet approach in porous media. Mesh in dependency test is conducted and results are compared with a recent previous study. Velocity, mixture fraction, gas and solid temperature distribution are presented in results as well as some major species concentrations. In our literature survey, we haven't seen any study applying same approach before. With this approach, methane-air reaction is solved using GRI 3.0 mechanism but complexity of the chemical reactions wasn't involved in the computations since it was tabulated in the pre-processing process. Doing so, computational power and time is reduced comparing solving detailed chemistry with the same mechanism for the same problem.

1. GİRİŞ

Fakir yakıt-hava karışımlarının yanması, hidrokarbonların kimyasal enerjilerini kullanılabilir güce verimli bir şekilde dönüştürebilmeyi sağlar. Geleneksel yanma teknolojilerinde, ısı kayıplarından dolayı alevin kendi kendine yayılmasını sınırlayan nedenler bulunmaktadır. Gözenekli ortamda yanma gelişmiş bir teknoloji olup, gözenekli ortamı oluşturan katı matrisin yanmış sıcak gazların ısılarının bir miktarını yanmamış gazlara geri dönüşünü sağlamaktadır. Bu ısı transferi ile yakıt-hava karışımlarının tutuşma limitleri standart değerlerinden azalarak daha fakir karışımlarının yanmasına imkan sağlamaktadır.

Gözenekli ortamda yanma teknolojisini diğer yanma sistemlerinden üstün kılan bazı yönleri bulunmaktadır. Bunların başlıcaları daha düşük seviyede CO ve NO_x gibi atık gazlarının emisyonuna izin vermesi ve göreceli olarak daha küçük boyutlarda daha yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilmeleridir.

Yanmanın gerçeğe ne kadar yakın modellenmesi, o kadar yüksek hesaplama gücü ihtiyacına yol açmaktadır. Bu yüzden yanma benzetimlerinin ihtiyaç duyduğu hesaplama gücünü azaltabilmek için yanmanın kimyasal kinetiği basitleştirilebilir. Çalışmamızda böyle bir basitleştirme, flamelet model ile gözenekli ortam için uygulanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada gözenekli ortamda yanma olayı, içerisinde farklı gözenekliliklere sahip 3 bölümden oluşan dikey bir kanalda sayısal olarak incelenmiştir. Bu inceleme proje kapsamında FORTRAN dilinde geliştirilen SIMPLE Algoritması tabanlı bir kod aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki bu konuda yapılan çalışmalar ışığında, modelde yanmamış gazların sıcaklığının tepkime öncesi sıcaklığının arttırılması planlandığından, yanma ısısının bir kısmının yanmamış gazlara geri dönüşü yapılacaktır, bu yüzden gözenekli kanalın ilk bölümü karışım odası olarak düşünülmüş ve alevin burada tutunamaması istenmiştir.

Katı ve gaz sıcaklıklarının özellikle yanma bölgesinde birbirinden farklılık göstereceği göz önünde bulundurularak ısı dengesi model kullanılmış ve sonuç olarak uygulanan sınır koşullarında kanal içerisinde hız, katı/gaz sıcaklığı ve tür kesirlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar gözenekli kanalda kullandığımız yanma modelinin doğruluğunu ölçmek için literatürde daha önceden yapılmış diğer sayısal ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılacaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Günlük hayatımızda gözenekli ortamlar her alanda karşımıza çıkabilmektedir, bu yüzden içerisinde akışın oluşabilmesine izin veren bir gözenekli ortamda akış ve enerji konuları bilim ve mühendisliğin bir çok alanını ilgilendirmektedir. Bununla beraber gözenekli ortamda yanmanın daha önce bahsedilen üstünlüklere sahip olması, bu olayın araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmasını sağlamıştır.

Weinberg [1], yanma ısısının yanmamış gazlara iletilmesi ile hem verimin artırılabilceğini hemde atık gazların emisyonunun düşürülebileceğini öne süren ilk araştırmacılarıdır. Gözenekli ortam kullanılmadan önce ısıyan yanmamış gazlara geri kazanımı sağlamak için en yaygın kullanılan diğer bir yöntem, sıcak yanmış gazların bir kısmının yanmamış gazlar ile karıştırılmasıydı. Bu yöntem ile yanmamış gazların sıcaklıklarının artması sağlanabilmiştir fakat aynı zamanda yakıt karışımı da seyreltilmiştir. İlk defa 1979 yılında Takeno ve Sato [2], gözenekli ortamın yanma bölgesinde kullanılması fikrini ileri sürmüşlerdir. Bu çalışmalarındaki matematik modelde taşınım ve iletim ile ısı transferi kullanılırken, ışıyanım ile ısı transferi ihmal edilmiştir ve tepkime kimyası tek-adım olarak ele alınmıştır. Bu çalışmalarının hemen ardından yayınladıkları diğer bir çalışmada deneysel sonuçlara yer verilirken, sayısal çözümde çevreyle ısı transferinide hesaplamalara dahil etmişler [3]. Gözenekli ortamda yanmanın incelendiği bu ilk çalışmaları çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar takip etmiştir [4–7]. Gözenekli yakıcı teknolojisinde diğer bir önemli gelişme gözenekli ortamın iki bölümden oluşturulması fikriydi [8]. Bu fikir ile yakıt ve gaz önce ortalama gözenek çapının çok küçük olduğu bölüme gelerek yanmadan önce hem karışıyor hemde ısıyorlar. İkinci bölüm olan yanma bölgesine gelen gazların sıcaklıkları arttığından, daha fakir karışımların kararlı yanmaları mümkün hale geliyor.

Zhou ve Pereira [9] gözenekli ortamda yanmayı tek boyutlu olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında metan ve hava tepkimesi için 27 tür ve 73 reaksiyon içeren detaylı bir mekanizma kullanırlarken katı matrisin taşınım ve ısıma ile ısı transferi yaptığını göz önünde bulundurmuşlardır. Sayısal olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarının sonucunda, hava fazlalığı oranının, katı iletkenliğinin ve ısıma ile ısı transferinin yanma üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

Diğer bir tek boyutlu çalışmada Barra ve Ellzey [10] yanmanın tüm kimyasını içeren bir sayısal model ile ısının geri kazanımını araştırmışlardır. Çalışmalarında katının ısı iletkenliğinin önemini çeşitli kararlı koşullar için incelemişlerdir. Sonuçlarında, ısının geri kazanım oranının artan yakıt oranı ile azaldığı ve ısı iletkenliği ile ısımanın ısı transferi sürecinde önemli rol oynadığı görülmüştür.

Smucker ve Ellzey [11] sayısal ve deneysel yollar ile iki bölümden oluşan bir gözenekli yakıcı üzerine araştırma yapmışlardır. Deney çalışmalarında iki farklı yakıtın, metan ve propan, hava ile kararlı yanma aralığı incelenmiştir.

Diamantis [12] gözenekli ortamda yanma için geniş bir çalışma aralığında kullanılabilen bir matematik model geliştirmiştir. Modellerinin başarısı özellikle sınır koşulları için yaptıkları detaylı çalışmalar ve ısıma ile ısı transferi modelinin hiç bir basitleştirme içermeyen gözenekli ortam içerisinde uygulanmasıdır.

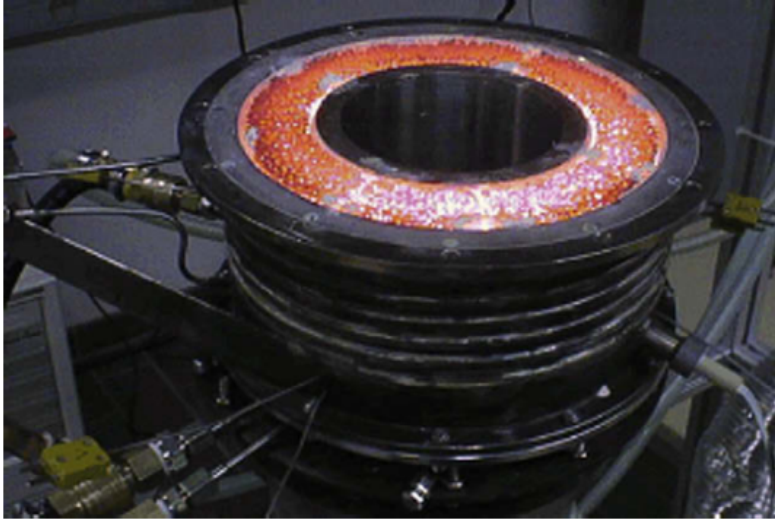
Mishra [13] bir çalışmada iki boyutta sayısal bir çalışma ile metan-hava karışımının yanmasını ve ısı transferini incelemiştir. Katı ve gaz için birbirinden ayrı iki denklem çözerek ısı dengenin olmadığını göz önünde bulundurmuştur.

Gözenekli ortam içerisindeki yanmada, atık gazlarının salınımının düşük olmasının başlıca nedenlerinden birisi yanmanın daha fakir hava-yakıt karışımlarında kararlı bir şekilde sürdürülebilmesidir. İki bölümden oluşan bir gözenekli kanalda yapılan bir çalışmada, gazların girdiği ön kısım küçük gözeneklilik çapına sahip ısıtma odası olarak kullanılmış ve bir santimetrede 25.6 gözeneğe sahip iken diğer bölüm yanmanın tutunabileceği daha büyük gözeneklerden oluşup santimetrede 3.9 gözeneğe sahiptir. Kanal çıkışında karbonmonoksit (CO) ve nitrojen oksit (NO_x) seviyeleri ölçülmüş ve sonuçlar her iki türün seviyesinin, karışım fakirleştikçe yani karışımın eşdeğerlik oranı azaldıkça, düştüğünü göstermektedir [5].

Diğer benzer bir çalışmada farklı boyutlarda küresel toprak ile oluşturulmuş iki bölümlü bir gözenekli kanal incelenmiş ve sonuçlar yanmanın kararlı olduğu hava-yakıt karışım oranı aralığının çok geniş olduğunu, atık gaz salınımının düşük olduğunu ve gözenekli ortamın 20:1 gibi dinamik yüksek-güç aralığına sahip olduğunu göstermiştir [6].

Marbach ve Agrawal [14], yanmayı karbür kaplı karbon-karbon kompozit köpük içerisinde incelemiştir. Çalışmaları sıcaklığın sürekli 1675 K'den yüksek olduğunu koşullar için dizayn edilmiş kompozit köpüğün yanma başarımı üzerine yoğunlaşmıştır.

Agrawal ve Vijaykant [15], diğer bir çalışmada gözenekli ortam içerisinde kerosenin yanmasını araştırmıştır. Ön ısınma ve yanma bölümlerine sahip iki kısımdan oluşan gözenekli bir yakıcı kullanılarak kerosenin çeşitli karışım oranlarında kararlı bir şekilde yanabilmesi sağlanmıştır. Silikon karbid kaplı karbon köpüklerin çok çeşitli konfigürasyonları farklı gözenek çapları için test edilmiştir, çalışmalarında temel amaç NO_x ve CO salınımlarının azalmasını sağlamaktır. Şekil 1.1'de gözenekli ortamda yanmanın bir görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 1.1 : Gözenekli ortamda yanma [16].

1.3 Hipotez

Bu çalışmada yanma için kullanılan flamelet model, yanma kimyasını çözüm algoritmasına dahil etmemektedir. Bu nedenle karmaşık ve çok fazla tür ve tepkime adımı içeren mekanizmaların çözümü geliştirdiğimiz program ile diğer yanma

modelleri ile karşılaştırıldığında çok daha az hesaplama zamanı kullanacaktır. Sonuç olarak, literatürde gözenekli ortamda yanma konusu için yaptığımız araştırmalarda flamelet yaklaşımının daha önce uygulamasının olmadığı görülmüştür ve bu çalışmada ilk olarak kendimiz bu yaklaşımı gözenekli ortam için modellemiş olacağız.

2. GÖZENEKLİ ORTAM

Bu bölümde gözenekli ortamın tanımı ve gözenekli ortamı ifade eden terimler hakkında kısaca bilgi verilip, daha sonra gözenekli ortamda yanma konusuna geçilecek ve önce gözenekli ortamda yanmanın ne koşullarda meydana geldiği, gözenekli ortam çeşitleri ve son olarak gözenekli ortamda yanmanın uygulama alanları anlatılacaktır.

2.1 Gözenekli Ortam Nedir?

Bir malzemenin gözenekli ortam kabul edilebilmesi için, malzemenin kendi boyutları ile karşılaştırıldığında içerisinde çok küçük ve birbiri ile bağlantılı boşluklar içermesi ve malzemenin bir ucundan giren akışkanın diğer bir ucundan çıkabilmesi gerekmektedir [17]. Gözenekli ortamı ifade eden parametreler gözeneklilik, geçirgenlik ve akış yatağı olarak adlandırılır.

Gözeneklilik , ϵ , malzeme içindeki toplam boşluk hacminin, malzemenin bütün hacmine oranı olarak tanımlanır ve 0 ile 1 arasında bir değer alır. Denklem 2.1’de geçirgenlik tanımı gösterilmiştir;

$$\epsilon = \frac{\text{Malzeme İçindeki Toplam Boşluk Hacmi}}{\text{Malzemenin Toplam Hacmi}} \quad (2.1)$$

Gözeneklilik en iyi şekilde ışığın veya elektromanyetik gama ışınlarının malzeme içinden geçerken zayıflamasının ölçülmesiyle bulunabilir [18].

Akış yatağı, λ , sabit bir sayıya eşit olmayıp, gözenekliliğe, gözeneklilik çapına ve boşlukların şekillerine göre değişir.

Geçirgenlik, K, gözenekli ortamda akışkanın malzeme içerisinden geçme kolaylığının bir ölçüsüdür. Diğer iki parametre boyutsuz iken geçirgenliğin birimi m^2 ’dir. Çizelge 2.1’de günlük hayatımızda karşılaştığımız bazı malzemelerin gözeneklilikleri gösterilmiştir.

Gözenekli ortamda akışı modellemek için kullanılan en eski yasa 1856 yılında Henry Darcy tarafından yapılan deneyler sonucunda bulunmuştur. İlk yasa olduğu için sadece düşük hızlarda geçerli olması gibi bazı kısıtlamaları bulunan Darcy yasası bir çok

araştırmacı tarafından geliştirilmiş ve daha yüksek hızdaki akışlarda akışın doğrusal olmayan etkisini modellemeye yardımcı olmuştur.

Çizelge 2.1 : Günlük hayattan bazı malzemelerin geçirgenlikleri [19].

Malzeme	Geçirgenlik m^2
Temiz Çakıl Taşı	$10^{-7} - 10^{-9}$
Temiz Kum	$10^{-9} - 10^{-12}$
Tuğla	$10^{-9} - 10^{-11}$
Beton	$10^{-7} - 10^{-9}$
Sigara	1.1×10^{-5}

2.2 Gözenekli Ortamda Yanma Olayı

Gözenekli yakıcılarda, yanmış gazlardan yanmamış gazlara, katı matristeki ısı iletimi yardımı ile bir ısı dönüşü gerçekleşmektedir. Bu ısı geçişi nedeni ile yanmamış gazların tepkime öncesi artan sıcaklıkları, daha fakir karışımların kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır. Bilindiği üzere karışımın giderek fakirleşmesi, oluşacak maksimum sıcaklığın azalmasına anlamına gelmektedir.

Gözenekli yakıcıların genel başarımı seçilen geometrik özelliklerinin yanı sıra katı matrisi oluşturan malzemenin seçiminde bağlıdır. Yanma odasında kullanılmak üzere çok farklı geometrik yapılandırma seçenekleri mümkündür, bunlara örnek olarak seramik köpükler, belirli çapta kürelerden oluşan yataklar ve metal alaşımlarından oluşan tel örgüler gösterilebilir. Bütün bu geometrik yapılandırmaların ortak amacı, yüksek ısı kapasite ve birim hacimde yüksek yüzey alanı oluşturarak açığa çıkacak enerjinin maksimum seviyede geri dönüşünün sağlanabilmesidir. Kullanılacak yakıt tipine ve yoğunluğuna göre malzeme seçimi yüksek sıcaklıklara dayanabileceği şekilde yapılmalıdır. Gözenekli ortamın ısı genişleme katsayısıda yakıcının ısınması ve soğuması sırasında oluşacak yüksek gradyanlardan dolayı düşük olmalıdır.

Alevin gözenekli ortam içinde tutunabilmesi için, ortamın gözeneklilik ve geçirgenliğinin iyi bir şekilde ayarlanması gerekmektedir, çünkü alevin gözenekli ortamda yayılabilmesi için Peclet sayısının 65'in üzerinde olması şarttır. Yanmanın gözenekli ortamda sürdürülebilmesi için en önemli faktör kritik gözenek çapıdır. Eğer ortamın gözenek çapı bu kritik değerden düşük ise iletim ile olan ısı transferi miktarı, yanma

olayından oluşacak ısı miktarının üzerinde olacaktır ve bu alevin söneceği anlamına gelmektedir. Denklem 2.2’de Peclet sayısı gösterilmiştir.

$$Pe = \frac{S_L d_p c_p \rho}{k} \quad (2.2)$$

Burada S_L laminar alev hızını, d_p eşdeğer gözeneklilik çapını, c_p gaz karışımının ısı kapasitesini, ρ gaz karışımının yoğunluğunu ve son olarak k , yine gaz karışımının ısı iletkenliğini temsil etmektedir.

Gözenekli ortam doğal olarak oluşmuş yada işlenmiş olabilir. Gözenekli ortam oluşturulmasında kullanılan malzemenin özellikleri iyi bilinmelidir ki, oluşacak yüksek ısı alışverişi iyi modellenip istenilen uygulama için optimize edilebilsin. Çizelge 2.2’de kullanılan bazı malzemelerin özellikleri verilmiştir. Seramik ve metalik malzemelerin ikisinde gözenekli ortam oluşumu için uygundur ve kendilerine göre avantajlara sahiptirler. Seramikler yanmamış gazların bulunduğu ilk bölümde istenilecek yüksek ısı iletme sahiptirler. Alüminyum oksit göreceli olarak ucuz, ortalama bir ısı iletkenliğe sahip ve yüksek kullanım sıcaklıklarına (1700 °C) dayanmaktadır ancak ısı genişleme katsayıları yüksektir [20]. Bunun yanında silikon oksit yüksek ısı iletkenliğe ve kullanım sıcaklığına sahip olmasının yanı sıra düşük ısı genişleme katsayısına sahiptir ve ısı şoklara karşı yüksek dayanıklılık gösterir. Çizelge 2.2’de bazı gözenekli ortam malzemelerinin termofiziksel özellikleri verilmiştir.

Gözenekli ortamın yüksek ısı iletim özellikleri, en yüksek yanma sıcaklığı değerini düşürerek ve kanaldaki sıcaklık dağılımının daha homojen olmasını mümkün kılarak, zararlı gaz salımlarının azalmasını sağlar. Radyant yöndeki yüksek ısı iletimi, daha düşük yanma sıcaklığı oluşturmak gibi bir üstünlük sağlar iken, eksenel yöndeki yüksek ısı iletiminde, tutuşma öncesi yanmamış gazların sıcaklıklarının daha etkili olarak artmasını sağlayarak, yakıcı boyutunun küçültülebilmesine ve güç yoğunluğunun artmasına izin verir [20].

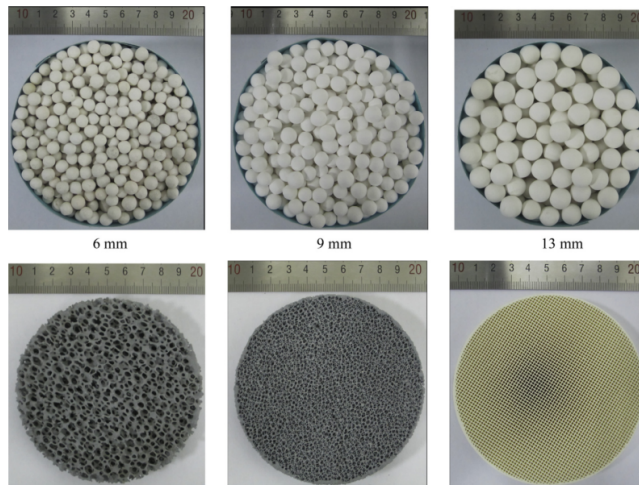
Şekil 2.1’de farklı çeşitli gözenekli ortam örnekleri gösterilmiştir.

Seramik köpüklerin iletim ile ısı transferleri iyi, ışıma ile ısı transferleri düşüktür ve göreceli olarak yüksek basınç düşüşüne sahiptirler. Diğer gözenekli ortamlar ile karşılaştırıldıklarında, seramik köpükler geniş yüzey alanlarına sahip olduklarından

Çizelge 2.2 : Bazı gözenekli ortam malzemelerinin termofiziksel özellikleri [21].

Malzeme	Ortalama Isıl Genişleme Katsayısı	Isıl İletkenlik	Erime Noktası	Kullanım Sıcaklıkları
	$30 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10^{-6} K^{-1}	W/mK	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
PSZ	9-13	1.2-3	2700	900-2400
ATI	5	1.7		900-1600
Al_2O_3	6-8	10-16	2050	1400-1500
SSN	2.5-3.5	15-45		1750
RBSN	2.1-3	4-15		1100
HPSN	3.0-3.4	15-40		1400
AlN	4.5-5	100-180		1750
SSIC	4-4.8	40-120	2800	1400-1750
HPSIC	3.9-4.8	80-145		1700
RSIC	4.8	20		1600
HSIC	4.8	14-15		1450
PS1		13	1500	1400

dolayısı katı ve gaz faz arasında çok daha iyi taşınım ile ısı transferine olanak sağlamaktadırlar. Köpükler aynı zamanda çok çeşitli şekillerde kolaylıkla üretilebilirler. Köpüklerin hareketsiz katı yapıları, taşınabilir uygulamalarda kürelerden oluşan yataklar gibi hareketli gözenekli ortamlara nazaran avantaj sağlamaktadır. Köpükler %70-%90 gibi yüksek gözenekliliklere sahiplerdir ve sürekli yapılarından yani kendi içerisinde her noktada aynı özellikleri göstermesinden dolayı taşınımın yanı sıra kendi içerisinde yüksek iletim ile ısı transferi gerçekleştirebilirler.



Şekil 2.1 : Çeşitli gözenekli ortam örnekleri [22].

2.3 Kullanım Alanları

Yüksek oranda gözeneklilik bulunduran metal, seramik ve polimerlerin kullanımı günümüzde gittikçe yaygınlaşmaktadır. Gözenekli ortamın kullanım alanları içerisinde bulunan boşlukların yapısına göre bağlılık göstermektedir. Genel olarak boşlukların yapısını iki gruba ayırırsak, bunlar bir birleri ile bağlantılı boşluklar ve bir birleri ile bağlantısı olmayan boşluklar olarak tanımlanabilir. Bir birleri ile bağlantılı olmayan boşluklar içeren gözenekli yapılar genel olarak termal yalıtım ve hafif yapı malzemeleri olarak kullanılırken, boşlukları bir birleri ile bağlantılı gözenekli ortamların kullanım alanları daha çok sıvı-gaz süzgeçleri ile ısı değiştiricilerdir.

Bu malzemelerden seramik gözenekli ortamlar düşük yoğunluk, yüksek termal iletkenlik, ısıl şoklara dayanım gösterebilme ve birim hacimde geniş yüzey alanına sahip olma gibi özellikler bulundurmasıyla özellikle yüksek sıcaklık dayanımı isteyen uygulamalarda metal ve polimerlere kıyasla üstünlük sağlamaktadır. Bu avantajlarından dolayı, seramik gözenekli ortamlar filtrelerde, ısıtıcılarda, ısı değiştiricilerinde, katalizör taşıyıcı ve kemik yerini alan bio malzemelerde, ısı yalıtım malzemelerinde ve hafif zırh malzemelerinde kullanımı son zamanlarda büyük ilgi çekmiştir.

Gözenekli yakıcıların kullanım alanlarına gelirse, şu şekilde başlıklar altında toplayabiliriz;

- Hava ve Su Isıtması Sistemlerinde
- Zirai ve Endüstriyel Kurutma Sistemlerinde
- Gaz Türbinlerinde
- Araba, Karavan, Yat, Uçak Gibi Araçların Isıtma Sistemlerinde
- İçten Yanmalı Motorlarda
- Endüstriyel Yakıcı Sistemlerinde

3. YANMA MODELİ

Yanma modeli türlerin derişikliği, üretimi ve parçalanması ile entalpi, sıcaklık ve karışım yoğunluğu gibi sistem parametreleri ile ilgili bilgileri sağlamakta yeterli olmalıdır. Bunların sağlanabilmesi için akış için genel taşınım denklemleri ve enerji denkleminine ek olarak yanmanın kimyası ve kimyasal kinetikleri içeren denklemler çözülmelidir.

Çoğu yanma sistemlerinde yakıt ve oksitleyici yanma odasına ayrı olarak girmektedirler. Bu yüzden kimyasal tepkime ve yanma aynı anda meydana gelmektedir. Ama şu çok belirgindir ki, kimyasal reaksiyon oluşması, türlerin karışıp birleşmesinden çok daha hızlıdır. Buradan yanma oranının, karışma oranı tarafından denetlendiği söylenebilir.

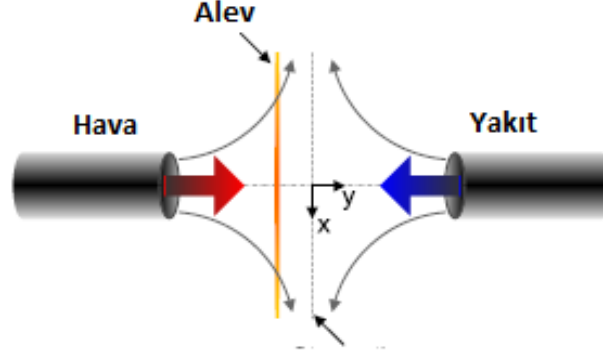
Yanmanın sayısal olarak modellenmesinde bazı problemler ile karşılaşılabilir. Bunların başlıcaları olarak kimyasal reaksiyonda çok sayıda bileşenin bulunması ve zaman ölçeğinin karışma ile reaksiyon arasında çok yüksek uyumsuzluk göstermesi söylenebilir.

3.1 Laminar Flamelet Model

Laminar flamelet model ilk olarak 1984 yılında N. Peters tarafından ortaya atılmıştır ve yanmayı modellemek için kullanılan SCRS (Simple Chemical Reacting System) ve Eddy Break-Up gibi yöntemlerden biridir. Bu yöntem türbülanslı alevi ince, laminar ve yerel olarak tek boyutlu, flamelet yapılarının bir toplamı olarak kabul eder. Karsı akışlı (counterflow) difüzyon alevi, yaygın bir laminar alev olup türbülanslı akışta flameletleri temsil etmek için kullanılır. Flamelet modeli kullanılarak, alevin akış dinamiği ve karmaşık kimyasal reaksiyon yapıları birbirinden ayrı olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte, laminar flamelet model alevde türbülans etkisi ile ortaya çıkan aerodinamik gerilimler sonucunda oluşan kimyasal dengesizliklerin tahmin edilmesinde de kullanılabilir. Bu model ile kimya önışlem olarak çözümlü,

tablo haline getirilerek inanılmaz bir hesaplama süresinde azalma sağlanır.

Şekil 3.1’de ters akışlı difüzyon alevi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Ters akışlı difüzyon alevi [23].

3.1.1 Laminer flamelet model korunum denklemleri

Laminer flamelet model için korunum denklemleri, ters akışlı difüzyon alevleri için kullanılan korunum denklemlerinin fiziksel uzaydan karışım kesri oranı (Z) uzayına uygun dönüşümü yapılarak elde edilebilir. Bu dönüşümün yapılmasının sebebi ise korunum denklemleri içinde yer alan karışım kesri oranının bağımsız bir değişken olarak denklemlerde yer almasını sağlamaktır.

Laminer flamelet model için türlerin ve enerjinin korunumu denklemleri şu şekilde ifade edilebilir; Türlerin kütle kesri Denklem 3.1’de verilmiştir;

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \rho \frac{\chi}{2} + \frac{\partial^2 Y_i}{\partial Z^2} + w_i \quad (3.1)$$

Burada Y_i i’ninci türün kütle kesrini, t zamanı, ρ yoğunluğu, χ skaler dağılım oranını, Z karışım kesrini ve son olarak w_i i’ninci türün oluşum oranını temsil etmektedir.

Lewis sayısı ısı yayılımının kütle yayılımına oranını temsil eden boyutsuz bir sayıdır ve Denklem 3.2 ile gösterilmiştir.

$$Le = \frac{\alpha}{D} \quad (3.2)$$

Burada Le Lewis sayısını gösterirken, α ısı yayılım katsayısı iken D kütle yayılım katsayısıdır.

Enerji korunumu Denklem 3.3'te verilmiştir;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \rho \frac{\chi}{2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} - \frac{1}{c_p} \sum_{i=1}^n h_i w_i + \frac{Q}{c_p} \quad (3.3)$$

Burada T sıcaklığı, c_p özgül ısıyı, h_i i'ninci türün entalpisini ve Q kaynak enerji terimini temsil etmektedir. Eğer yukarıdaki denklem 3.3'te $Q = 0$ ise flamelet adyabatiktir.

Korunum denklemleri olan Denklem 3.1 ve 3.3 görüldüğü gibi şunlara bağlıdır:

- Karışım kesri Z
- Skalar yayılma χ
- Zaman t

Korunum denklemlerinde yer alan skaler dağılım oranı (χ) ise karışım kesri oranına bağlı olarak Denklem 3.4 yardımıyla hesaplanabilir,

$$\chi(Z) = \frac{a_S}{4\pi} \frac{\left(\sqrt[3]{\frac{\rho_o}{\rho}} + 1 \right)^2}{\sqrt[2]{\frac{\rho_o}{\rho}} + 1} \exp \left[-2 \left(\operatorname{erfc}^{-1}(2Z) \right)^2 \right] \quad (3.4)$$

Flamelet korunum denklemlerinin çözümü ile birlikte sıcaklık ve türlerin kütle kesri değerleri, karışım kesri oranına ve skaler dağılım oranına bağlı olarak bulunur. Yani bu korunum denklemleri kullanılarak oluşturulmuş olan flamelet tabloları ısı kayıplarını temsil edecek herhangi bir parametreye bağlı olarak oluşturulmadığı için adyabatik durum için geçerlidir.

3.1.2 Adyabatik olmayan koşullar için tabloların oluşturulması

Karışım kesri oranı (Z) ve skaler dağılım oranı (χ) alevin termokimyasal özelliklerini belirleyen iki önemli parametredir. Bu parametrelerin yanında ısı kayıplarını dikkate alabilmek için entalpi noksanlığı (ξ) parametresi hesaba katılmadığı. Entalpi noksanlığı parametresi gazın gerçek entalpisi H ve adyabatik durumdaki entalpisi arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu tanıma göre entalpi noksanlığı Denklem 3.5 ile şekilde gibi hesaplanabilir,

$$\xi = H - [H_o + Z(H_F - H_o)] \quad (3.5)$$

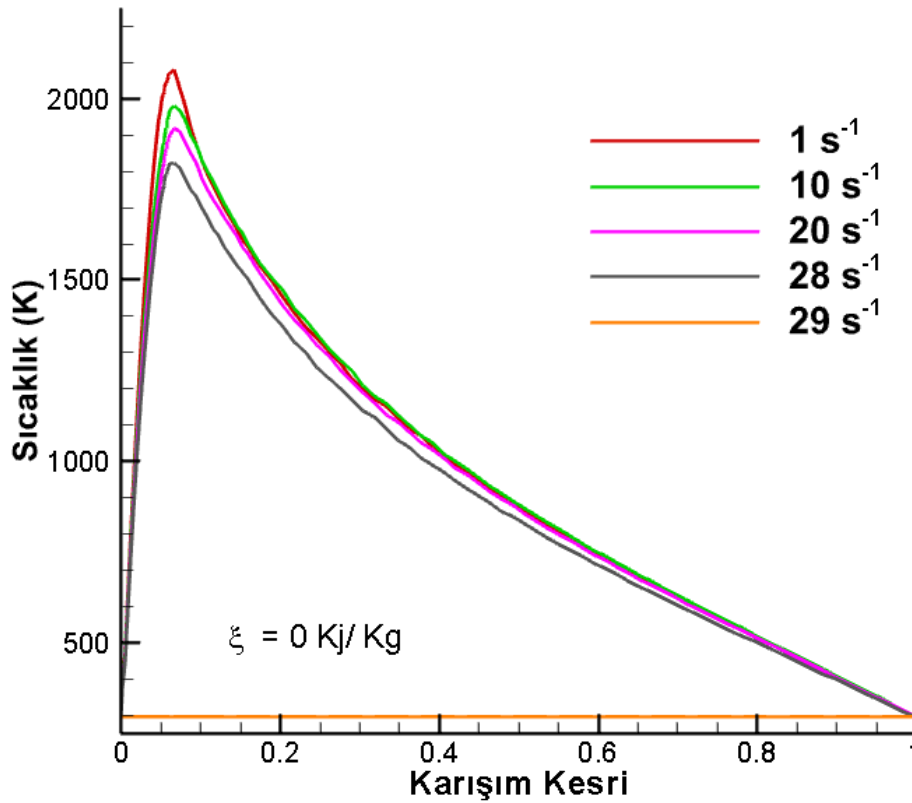
Burada ξ entalpi noksanlığını, H_o havanın entalpisini, H_f yakıtın entalpisini ve H gazın gerçek entalpisini temsil etmektedir.

Bu aşamadan sonra sıcaklık ve kütle kesri değerleri, flamelet tablolarında karışım kesri oranı (Z), skaler dağılım oranı (χ_{st}) ve entalpi noksanlığı (ξ) parametrelerine bağlı olarak elde edilmiş olunur. Denklem 3.6'da tablolardan değer okumak için kullanılan fonksiyon ($\bar{\psi}$) gösterilmiştir.

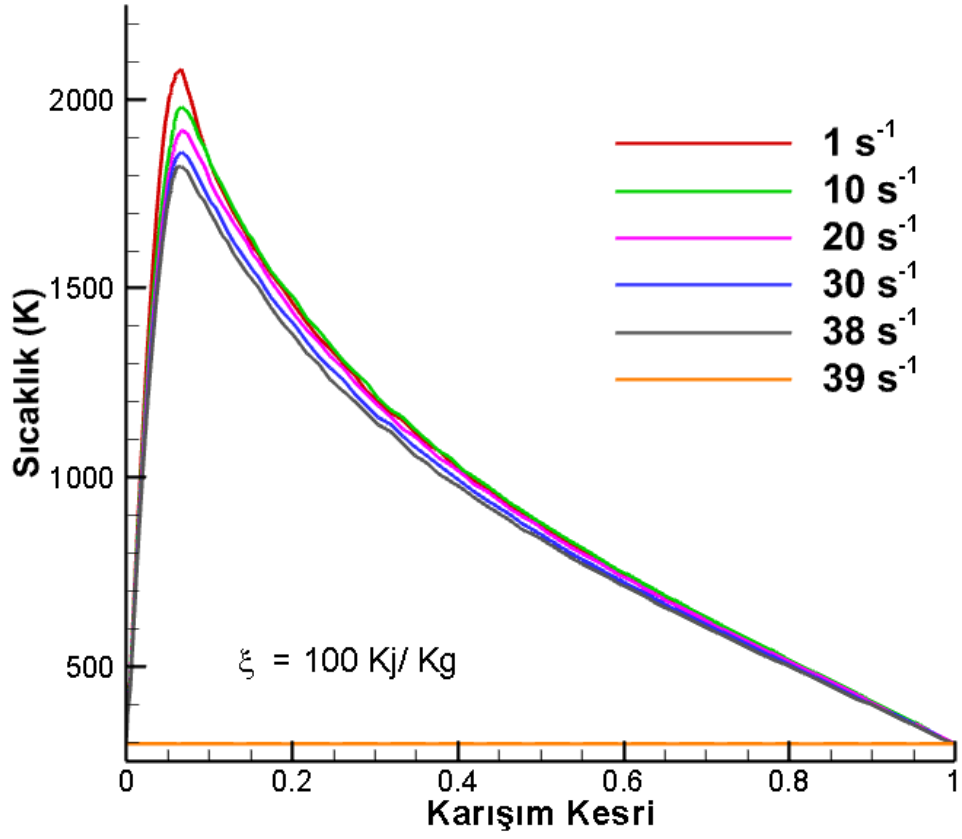
$$\bar{\psi} = \psi(Z, \chi_{st}, \phi_H) \quad (3.6)$$

Bilgisayar programında kullanılmak üzere -100 ile 350 arasında 10 farklı entalpi noksanlığı değeri ve her bir entalpi noksanlığı için 11 farklı skaler dağılım oranı değeri kullanılarak toplamda 110 adet flamelet tablosu oluşturulmuştur. Oluşturulmuş olan bu tablolardan sıcaklık ve türlerin kütle kesri değerleri, karışım kesri oranı, skaler dağılım oranı ve entalpi noksanlığı parametrelerine bağlı olarak okunmaktadır.

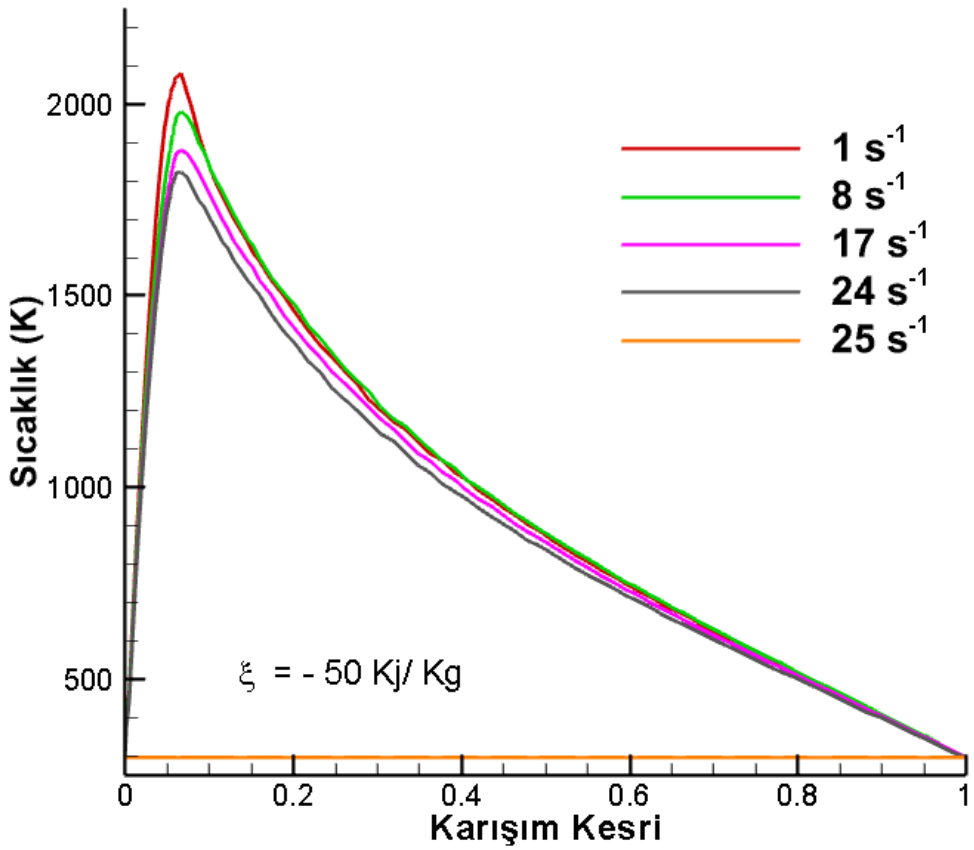
Şekil 3.2'de adyabatik koşullarda oluşturulan flamelet çizelgesi gösterilmiştir. Şekil 3.3'de entalpi noksanlığının pozitif olduğu (100kJ/kg) koşullarda oluşturulan flamelet çizelgesi gösterilmiştir. Şekil 3.4'de entalpi noksanlığının pozitif olduğu (-50kJ/kg) koşullarda oluşturulan flamelet çizelgesi gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Adyabatik koşullarda (Entalpi noksanlığı sıfıra eşit iken) oluşturulmuş flamelet tablosu.



Şekil 3.3 : Pozitif entalpi noksanlığında oluşturulmuş flamelet tablosu.



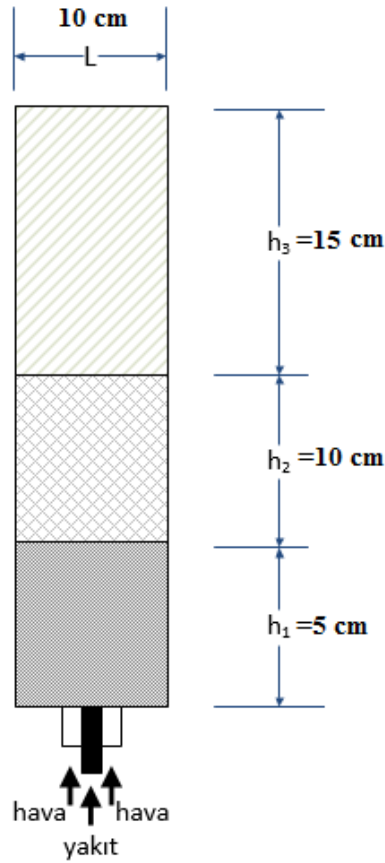
Şekil 3.4 : negatif entalpi noksanlığında oluşturulmuş flamelet tablosu.

3.1.3 GRI 3.0 mekanizması

GRI Mekanizması genel olarak, temel kimyasal reaksiyonları ve bu reaksiyonların oran sabiti ifadelerini içeren bir dizelgedir. Bizim kullandığımız GRI 3.0 mekanizması doğal gazın yanmasını modellenmek için optimize edilmiştir ve NO oluşumlarını ve yeniden yanmalarıda içermektedir. Mekanizma toplamda 53 türden oluşan 325 reaksiyona sahiptir [24]. Bütün reaksiyonlar tersinir kabul edilmiştir ve türlerin termokimyasal özellikleri NASA polinom sabitleri kullanılarak hesaplanmaktadır [25].

4. SAYISAL ÇÖZÜM

Çalışmada, farklı gözenekliklere sahip üç bölümden oluşan düşey bir kanalda yanma olayı sayısal olarak incelenecektir. İlk bölüm tepkimeye girecek gazların ön-ısıtılması için kullanılmaktadır bu yüzden burada düzenlenmiş Peclet sayısı kritik değerin altında olacağı şekilde tasarlanarak bu bölümde alevin yayılmasının önüne geçilmiştir. Problem aşağıda Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : Problemin şematik gösterimi.

Amacımız, bu kanalda katı ve gaz fazları arasındaki sıcaklık farkını göz önünde bulundurarak (ısı-dengesiz hal) yanma olayının Laminar Flamelet Yaklaşımı ve GRI 3.0 mekanizması ile modellenerek kanal içinde sıcaklık, hız dağılımı ve gaz karışımını oluşturan GRI 3.0 mekanizmasındaki her bir türün karışım kesri değerlerini hesaplayabilmektir.

4.1 Matematik Model

Hesaplamalara başlamadan önce ön-işlem olarak laminar flamelet denklemlerinin adyabatik olmayan koşullarda hem negatif hem pozitif çeşitli entalpi noksanlıkları ile çözülmesiyle modelimiz için gerekli flamelet çizelgelerinin oluşturulması gerekmektedir.

Problemimizi oluşturan düşey kanal iki boyutlu olarak modellenmiş ve akışın laminar olduğu varsayılmıştır. Çözüm alanında katı faz sıcaklığını ve akışı yöneten denklemler zamana bağlı olarak çözülmüşlerdir.

Denklem 4.1’de gözenekli ortam için süreklilik denklemi gösterilmiştir;

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \langle u \rangle) = 0 \quad (4.1)$$

Burada $\langle u \rangle$ gözenekli ortam içerisindeki hız ve ρ_g gaz fazının yoğunluğudur.

Denklem 4.2’de gözenekli ortam için momentum denklemi verilmiştir.;

$$\frac{\rho_g}{\varepsilon} \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial t} + \frac{\rho_g}{\varepsilon^2} \langle u \rangle \cdot \nabla \langle u \rangle = -\nabla p + \frac{\mu_g}{\varepsilon} \nabla^2 \langle u \rangle - \frac{\mu_g}{K} \langle u \rangle + \rho_g C |\langle u \rangle| \langle u \rangle \quad (4.2)$$

Burada K , gözenekli ortamın geçirgenliğini, C ise sürüklenme katsayısını temsil etmektedir, Ayrıca p ile basınç ve μ_g ile gaz fazının vizkozitesi gösterilmiştir.

Gözenekli ortamın geçirgenliği Denklem 4.3’te verilmiştir;

$$K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{180(1 - \varepsilon)^2} \quad (4.3)$$

Burada d_p eşdeğer gözeneklilik çapıdır.

Gözenekli ortamın sürüklenme katsayısı Denklem 4.4’te verilmiştir;

$$C = 1.8 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} \quad (4.4)$$

Denklem 4.5’te gözenekli ortam için karışım kesri denklemi gösterilmiştir;

$$\frac{\partial (\rho_g Z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \frac{\langle u \rangle}{\varepsilon} Z) = \nabla \cdot (\rho_g D_z \nabla Z) \quad (4.5)$$

Burada D_z kütle yayılım katsayısını göstermektedir.

Karışım kesrinin Lewis sayısı Denklem 4.6’da verilmiştir;

$$Le_z = \frac{k_g}{\rho_g D_z c_{p,g}} \quad (4.6)$$

Burada k_g ile gaz fazının ısı iletkenliği, $c_{p,g}$ ile gaz fazının sabit basınçtaki öz ısısı temsil edilmiştir. Lewis sayı yaklaşık olarak 1 kabul edilmiştir. ($Le_z \approx 1$)

Scalar dağılım oranı Denklem 4.7’de gösterilmiştir;

$$\chi = 2D_z(\nabla Z \cdot \nabla Z) \quad (4.7)$$

Gözenekli ortamdaki yanmayı adyabatik kabul etmemiştik, Denklem 4.8 gaz fazının enerji denklemi;

$$\rho_g \left\{ \frac{\partial (\epsilon H_g)}{\partial t} + \langle u \rangle \cdot \nabla H_g \right\} = \nabla \cdot \left\{ \frac{k_g}{c_{p,g}} \nabla (\epsilon H_g) \right\} + h_v (T_s - T_g) \quad (4.8)$$

Burada H_g gaz fazının entalpisi, h_v hacimsel ısı taşınım katsayısı ve T_g ile T_s sırasıyla gaz ve katı fazın sıcaklıklarını temsil etmektedir.

Entalpi noksanlığı tekrar Denklem 4.9’da verilmiştir;

$$\xi = H - [H_o + Z(H_F - H_o)] \quad (4.9)$$

Karışım kesri, scalar dağılım oranı ve entalpi noksanlığı değerleri bulunduktan sonra ön-işlemede hazırladığımız çizelgelerden üç boyutlu ara değer bulma ile sıcaklık değerleri hesaplıyoruz.

Yanma sırasında gaz fazının yüksek sıcaklığa çıkmasından dolayı, katı ve gaz fazları arasında yüksek bir sıcaklık farkı oluşacağından fazlar arası ısı dengenin oluşmayacağı göz önünde bulundurulmuştur. Bu yüzden modelimize katı faz için ayrı bir enerji denklemi ilave edilmiştir. Denklem 4.10 katı faz için enerji denklemini göstermektedir;

$$(1 - \epsilon) \rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot k_s \nabla (1 - \epsilon) T_s + h_v (T_g - T_s) \quad (4.10)$$

Burada $C_{p,s}$ ve k_s sırasıyla katı faz için özgül ısıyı ve ısı iletim katsayısını temsil etmektedirler.

h_v hacimsel ısı taşınım katsayısı Denklem 4.11’de ki ifade ile hesaplanmaktadır;

$$h_v = \frac{Nu_v k_g}{d_p^2} \quad (4.11)$$

Burada Nu_v hacimsel Nusselt sayısıdır.

Ortalama Gözenek Çapı Denklem 4.12 ile hesaplanmaktadır (m);

$$d_p = \frac{1}{100PPC} \sqrt{\frac{4\varepsilon}{\pi}} \quad (4.12)$$

Burada π pi sayısını ve PPC santimetredeki gözenek sayısını ifade etmektedirler.

Hacimsel Nusselt sayısı Nu_v , deneysel sonuçlardan elde edilmiş çeşitli korelasyonlar ile ifade edilir, bunların çok rastlananlarına bakacak olursak;

Wakao ve Kaguei [26], deneysel bir çalışmalarında ön-ısıtma bölgesi için Denklem 4.13'teki korelasyonu elde etmişlerdir;

$$Nu_v = 2.0 + 1.1Re^{0.6}Pr^{1/3} \quad (4.13)$$

Nusselt sayısından Denklem 4.14 yardımı ile hacimsel ısı taşınım katsayısı hesaplanabilmektedir;

$$h_v = \frac{6\varepsilon Nu_v k_g}{d_p^2} \quad (4.14)$$

Younis ve Viskanta [27], bir çalışmalarında Nusselt sayısını C ile m iki değişken ve Reynolds sayısına bağlı bir ifade olarak göstermişlerdir, bu ifade Denklem 4.15'te verilmiştir

$$Nu_v = CRe^m \quad (4.15)$$

Buradan tekrar hacimsel ısı taşınım katsayısı Denklem 4.16 ile hesaplanmaktadır;

$$h_v = \frac{Nu_v k_g}{d_p^2} \quad (4.16)$$

Bu çalışmada seramik köpük için yanma bölgesinde elde ettikleri korelasyon Denklem 4.17'de verilmiştir;

$$Nu_v = 0.146Re^{0.96} \quad (4.17)$$

Karışım bölgesinde elde ettikleri korelasyon ise Denklem 4.18'de verilmiştir;

$$Nu_v = 0.638Re^{0.42} \quad (4.18)$$

Arayüzeydeki taşınım ile ısı transferi katsayısı için bir korelasyon Kuwahara [28] tarafından laminar akış için önerilmiştir ve bu korelasyon Denklem 4.19'de verilmiştir:

$$\frac{h_v d_p}{k_g} = \left(1 + \frac{4(1-\varepsilon)}{\varepsilon}\right) + \frac{1}{2}(1-\varepsilon)^{1/2} Re_{d_p} Pr^{1/3} \quad 0.2 \leq \varepsilon \leq 0.9 \quad (4.19)$$

Biz sonuçlarımızı bu korelasyonu kullanarak elde ettik.

4.1.1 Sınır koşulları

Flamelet yaklaşımındaki korunum denklemleri için sınır koşulları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere, sıcaklık ve basınç değerleri her iki taraf içinde eşit değerde alınmıştır. Yakıt tarafında gaz karışımı saf metan içermektedir, bu yüzden mol kesri 1 olarak alınmıştır.

Çizelge 4.1 : Flamelet tabloları için sınır koşulları.

Yakıt tarafında		Hava tarafında	
Sıcaklık	294K	Sıcaklık	294K
Basınç	1atm	Basınç	1atm
CH ₄ mole kesri	1.0	N ₂ mole kesri	0.21
		O ₂ mole kesri	0.79

Çözüm ağında akışı yöneten denklemler için sınır koşulları şöyledir;

x=0	$0 \leq y \leq 0.3 \text{ m}$	$u = v = 0$	$\frac{\partial H}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial x} = 0$
x=0.1 m	$0 \leq y \leq 0.3 \text{ m}$	$u = v = 0$	$\frac{\partial H}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial Z}{\partial x} = 0$
y=0.3 m	$0 \leq x \leq 0.1 \text{ m}$	$u = 0$	$\frac{\partial v}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial H}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial T_s}{\partial y} = 0$
y=0	Yakıt Girişi	$u=0$	$v = V_{yakıt}$	$H = H_{yakıt}$	$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$
y=0	Hava Girişleri	$u=0$	$v=V_{hava}$	$H=H_{hava}$	$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$
y=0	Duvarlar	$u=0$	$v=0$	$\frac{\partial H}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$

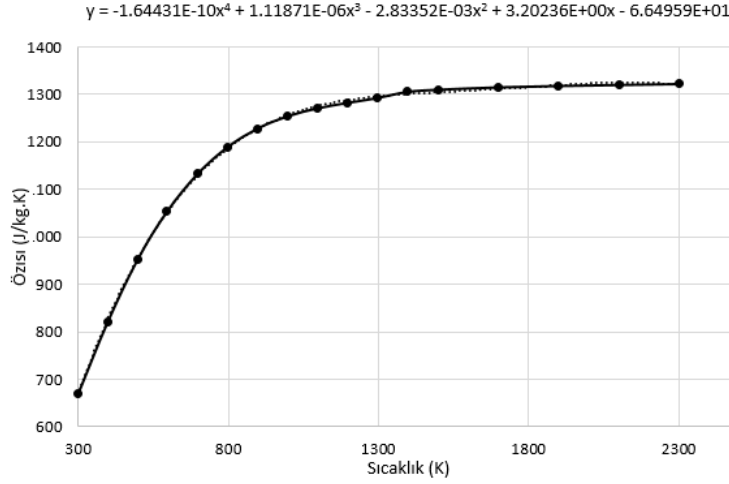
Bu sınır koşulları ile gözenekli yakıcıda yanma stokiyometrik oranda 10 kW güç üretecek şekilde gerçekleşmektedir.

4.1.2 Kanal ve akışkan özellikleri

İncelediğimiz üç bölümden oluşan dikey kanalın toplam boyutları 30x10cm’dir. Dikey olarak ilk bölümün yüksekliği (h_1) 5 cm, ikinci bölümün yüksekliği (h_2) 10 cm ve üçüncü bölümün yüksekliği (h_3) 15 cm’dir.

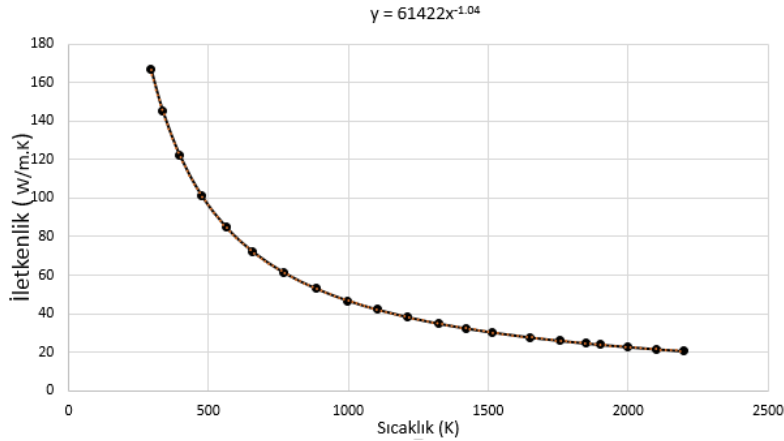
Gözenekli ortamı oluşturan malzeme olarak silikon karbid seçilmiştir. Bu malzeme düşük yoğunluğa ve yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasının yanı sıra, ısı ışınlara karşı direnci yüksektir. Katı malzemenin yoğunluğu her sıcaklıkta sabit kabul edilirken, özısı ve ısı iletkenlik değerleri sıcaklığın birer fonksiyonu olarak ele alınmışlardır. Bu fonksiyonlara, literatürde deneysel sonuçlar ile elde edilmiş veriler vasıtasıyla oluşturulmuştur.

Şekil 4.2’de deneysel inceleme sonucunda katı fazın özısının sıcaklık ile nasıl değiştiği gösterilmiş ve bu eğriden geçen en yakın fonksiyon çizdirilmiştir.



Şekil 4.2 : Katı faz için özısının sıcaklık ile değişimi [29].

Şekil 4.3'te aynı şekilde deneysel inceleme sonucunda katı fazın bu kez ısı iletkenliğinin sıcaklık ile nasıl değiştiği gösterilmiş ve bu eğriden geçen en yakın fonksiyon çizdirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.3 : Katı faz için ısı iletim katsayısının sıcaklık ile değişimi [29].

Dikey kanalımızın üç bölümden oluştuğunu bahsetmiştik. Her bir bölümün özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Burada gözenek çapları Denklem 4.12 ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2 : Gözenekli Ortam Özellikleri.

Özellikler	Giriş Kısım	Orta Kısım	Çıkış Kısım
Uzunluk (cm)	5.0	10	15
Gözenek Çapı (m)	5e-04	7e-04	9e-04
Gözeneklilik	0.85	0.85	0.85

Yanmanın modellenmesinde GRI 3.0 mekanizmasını kullanmıştık. Bu mekanizmada hatırlayacağımız gibi 53 tür ve 325 reaksiyon mevcuttur. Ön-işlem sürecinde oluşturduğumuz flamelet çizelgeleri, sıcaklık ve türlerin kütle kesirlerini içermesininin

yanı sıra, her karışım kesri için yoğunluk ve öz ısı gibi akış özelliklerindeki içermektedir. Böylelikle ihtiyaç duyulan gaz fazının bu özellikleri, sıcaklık değeri gibi çizelgelerden aynı şekilde üç boyutlu interpolasyon yapılarak elde edilmektedir.

Gaz fazı için vizkozite ve ısı iletkenlik katsayılarını hesaplamak için Lennard-Jones parametreleri kullanılmıştır [30]. Bu yöntemi kullanırken önce her bir türün sıcaklığa bağlı vizkozite ve ısı iletkenlikleri hesaplanmalıdır. Vizkozite ile başlayalım, her bir türün vizkozitesi Denklem 4.20 ile hesaplanmaktadır;

$$\mu_i = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{(M_i T)^{1/2}}{\sigma_i^2 \Omega^{(2,2)} T_r^*} \quad (4.20)$$

Bu denklemde μ_i her bir türün vizkozitesi gösterir iken, çarpışma integrali ($\Omega^{(2,2)}$) Denklem 4.21’de gösterilmiştir;

$$\Omega^{(2,2)} T_r^* = 1.147 (T_r^*)^{-0.145} + (T_r^* + 0.5)^{-2} \quad (4.21)$$

İndirgenmiş sıcaklık (T_r^*) ise Denklem 4.22’de verilmiştir;

$$T_r^* = T k_B / \varepsilon_i \quad (4.22)$$

Burada ε_i , M_i ve σ_i sırasıyla her bir türün Lenard-Jones potansiyelini, molar kütesini ve çarpışma çapını göstermektedir. Ayrıca k_B ise Stephan Boltzman sabitidir.

Bu denklemlerde ε_i/k_B ve σ_i her bir tür için farklı sabitlerdir [30]. Bu sabitler yardımıyla her bir türün vizkozitesi hesaplandıktan sonra karışım vizkozitesi Denklem 4.23 ile hesaplanır [31];

$$\mu = \sum_{i=1}^K \frac{X_i \mu_i}{\sum_{j=1}^K X_j \phi_{ij}} \quad (4.23)$$

Burada X_i i’ninci türün mol kesrini ifade etmektedir ve ϕ_{ij} ile gösterilen terim, Denklem 4.24’te verilmiştir;

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-1/2} \left(1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right)^2 \quad (4.24)$$

Karışımın ısı iletkenlik katsayısına gelirsek, Hayashi ve Hishida [32]’nin kullandığı Eucken düzeltmesi yardımıyla vizkoziteyi kullanarak her bir tür için ısı iletkenlik katsayılarını Denklem 4.25 yardımı ile hesaplayalım;

$$k_i = 0.25(9\gamma_i - 5)\mu_i C_{vi} \quad (4.25)$$

Bu denklemde γ , öz ısıların oranı ve C_{vi} i'ninci türün sabit hacimdeki öz ısıdır. Her bir tür için ısıl iletkenlik katsayısı bulunduğundan sonra karışımın ısıl iletkenlik katsayısı hesaplamak için vizkozite ile aynı denklemleri kullanabileceğimiz gibi, Denklem 4.26'da gösterilen yöntemde uygulayabiliriz;

$$k = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^K X_i k_i + \frac{1}{\sum_{i=1}^K X_i k_i} \right] \quad (4.26)$$

Her bir türün sıcaklığa bağlı özısılarını hesaplayabilmek için NASA polinomları kullanılmıştır, Denklem 4.27'de sabit basınçta öz ısıyı hesaplamak için kullanılan ifade gösterilmiştir;

$$\frac{C_p}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (4.27)$$

Bu denklemdeki katsayılar her bir tür için 1000 K sıcaklığından düşük ve yüksek olma koşulları için iki farklı değer alırlar ve R evrensel gaz sabitidir.

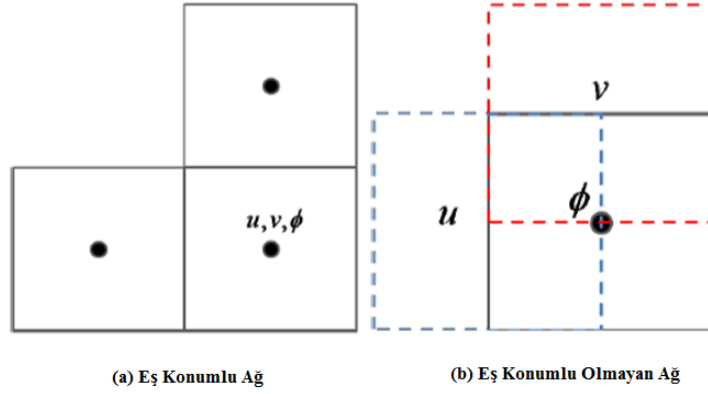
Çizelge 4.3'te katsayılar gaz karışımının vizkozite ve ısıl iletkenliğini hesaplamak için kullanılan türlerin Denklem 4.27'de kullanılacak katsayıları verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Polinom katsayıları [25].

Türler	Katsayılar		
O_2	$a_1 = 3.66096$	$a_2 = 5.56365E - 04$	$a_3 = -1.41149E - 07$
$T > 1000K$	$a_4 = 2.05797E - 11$	$a_5 = -1.29913E - 15$	
O_2	$a_1 = 3.78245$	$a_2 = -2.96673E - 03$	$a_3 = 9.84730E - 06$
$T < 1000K$	$a_4 = -9.68129E - 09$	$a_5 = 3.24372E - 12$	
N_2	$a_1 = 2.95257$	$a_2 = 1.39690E - 03$	$a_3 = -4.92631E - 07$
$T > 1000K$	$a_4 = 7.86010E - 11$	$a_5 = -4.60755E - 15$	
N_2	$a_1 = 3.53100$	$a_2 = -1.23660E - 04$	$a_3 = -5.02999E - 07$
$T < 1000K$	$a_4 = 2.43530E - 09$	$a_5 = -1.40881E - 12$	
H_2O	$a_1 = 2.67703$	$a_2 = 2.97318E - 03$	$a_3 = -7.73769E - 07$
$T > 1000K$	$a_4 = 9.44336E - 11$	$a_5 = -4.26300E - 15$	
H_2O	$a_1 = 4.19864$	$a_2 = -2.03643E - 03$	$a_3 = 6.52040E - 06$
$T < 1000K$	$a_4 = -5.46797E - 09$	$a_5 = 1.77197E - 12$	
CO_2	$a_1 = 4.63659$	$a_2 = 2.74131E - 03$	$a_3 = -9.95828E - 07$
$T > 1000K$	$a_4 = 1.60373E - 10$	$a_5 = -9.13103E - 15$	
CO_2	$a_1 = 2.35677$	$a_2 = 8.98459E - 03$	$a_3 = -7.12356E - 06$
$T < 1000K$	$a_4 = 2.45919E - 09$	$a_5 = -1.43699E - 13$	
CH_4	$a_1 = 1.63552$	$a_2 = 1.00842E - 02$	$a_3 = -3.36916E - 06$
$T > 1000K$	$a_4 = 5.34958E - 10$	$a_5 = -3.15518E - 14$	
CH_4	$a_1 = 5.14987$	$a_2 = -1.36709E - 02$	$a_3 = 4.91800E - 05$
$T < 1000K$	$a_4 = -4.84743E - 08$	$a_5 = 1.66693E - 11$	

4.1.3 Çözüm ağı oluşturma

Çözüm ağı oluşturmak için kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Bun yöntemler "Eş konumlu ağ" ve "Eş konumlu olmayan ağ" olarak adlandırılır. Bizim çalışmamızda çözüm ağı eş aralıklı dörtgen hacimler ile "Eş konumlu ağ" yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu ağ yönteminde vektörel ve skaler büyüklükler sonlu hacmin ortasındaki düğüm noktasında depolanmaktadır. "Eş konumlu olmayan ağ" yönteminde ise scalar büyüklükler tekrar sonlu hacmin ortasında depolanırken, vektörel büyüklükler sonlu hacmin arayüzeylerinde depolanır. Şekil 4.4'de çözüm ağı oluşturmak için kullanılan yöntemler gösterilmiştir.

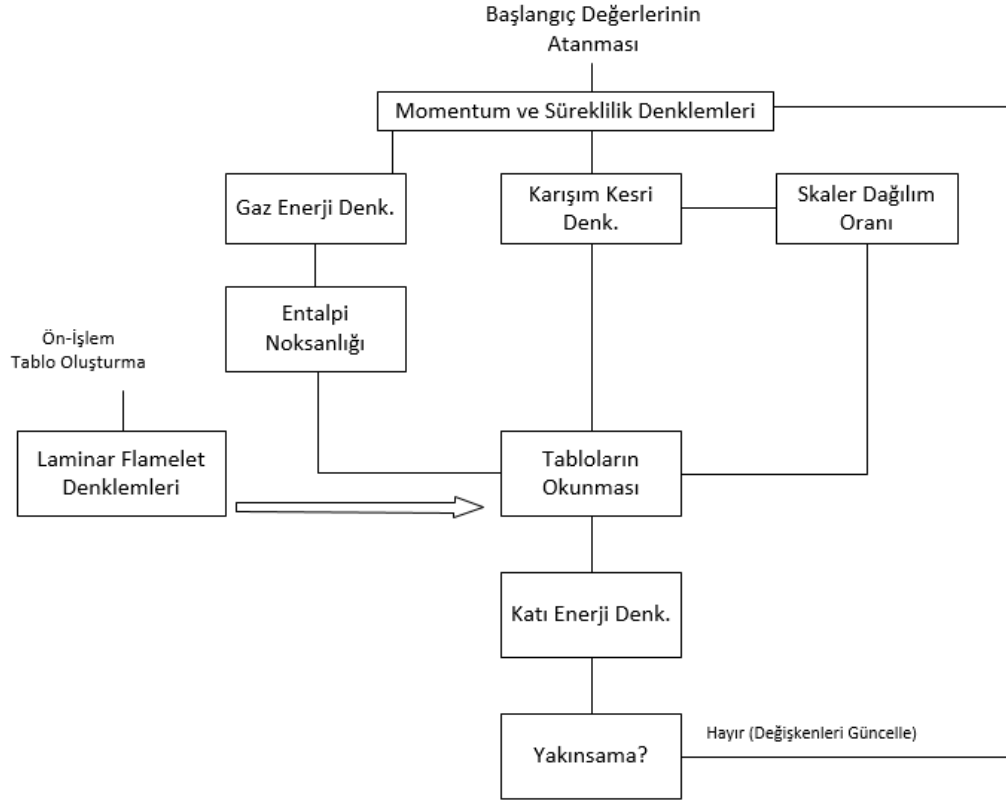


Şekil 4.4 : Çözüm ağı oluşturma yöntemleri.

4.2 SIMPLE Algoritması

SIMPLE algoritması, tam adıyla Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, akış alanının çözümünde kullanılmak için 1972 yılında Patankar ve Spalding tarafından oluşturulmuştur [33].

Şekil 4.5'te SIMPLE tabanlı algoritmamızın nasıl çalıştığını kısaca özetlenmiştir. Momentum, karışım kesiri, gaz enerjisi ve katı faz sıcaklığı denklemlerinin çözümünde ileride detaylı olarak anlatılan ADI (Alternating Direction Implicit) sayısal yöntemi, süreklilik denkleminin çözümünde yine ileride anlatılacak olan Gauss-Seidel yöntemi kullanılmıştır. Diğer değişkenler, scalar dağılım oranı ve entalpi noksanlığı sırasıyla önceden çözölen karışım kesiri ve gaz karışımı entalpisinin fonksiyonları olup direk olarak hesaplanabilmektedir. Akışkanın yoğunluk ve sıcaklık gibi özellikleri daha önceden bahsedildiği gibi tablolardan okunarak bulunuyor.



Şekil 4.5 : Problemimizin Çözüm Algoritması.

Çözüm aşında akışını yöneten denklemler, sonlu hacimler metodu ile ayrıklaştırılmış ve buradan elde edilen denklemler yön değiştirmeli kapalı yöntem (ADI) kullanılarak çözülmüştür. Son olarak cebirsel denklem sistemlerin çözümünde, üç bant genişlikli matris algoritması (TDMA) kullanılmıştır. Çözümde yakınsama problemlerinin oluşmasından dolayı çözülen her bir değişken için 0.9 ile 0.5 arasında rahatlama uygulanmıştır.

Yön değiştirmeli kapalı yöntem (ADI), parabolic, hiperbolik ve eliptik kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan sayısal bir çözüm yoludur [34]. Örneğin iki veya daha fazla boyutta ısı iletimi ve difüzyon denklemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılır.

Tek boyutlu problemlerde, diferansiyel denklemimiz ayrıklaştırıldığında bilinmeyen sayısı, noktanın kendisi ile ileri ve gerisindeki noktalar olmak üzere üç tanedir. Böylelikle elde edilecek denklem sisteminin tridiagonal matris biçiminde yazılması mümkündür. Böyle yazılabilir sistemler bilgisayar yardımıyla kısa zamanda basit bir algoritmayla çözülebilir. Bizim problemimiz iki boyutlu olarak kapalı (implicit) yöntem ile çözüleceğinden, denklem ayrıklaştırıldığında bilinmeyen sayısı üçten çok

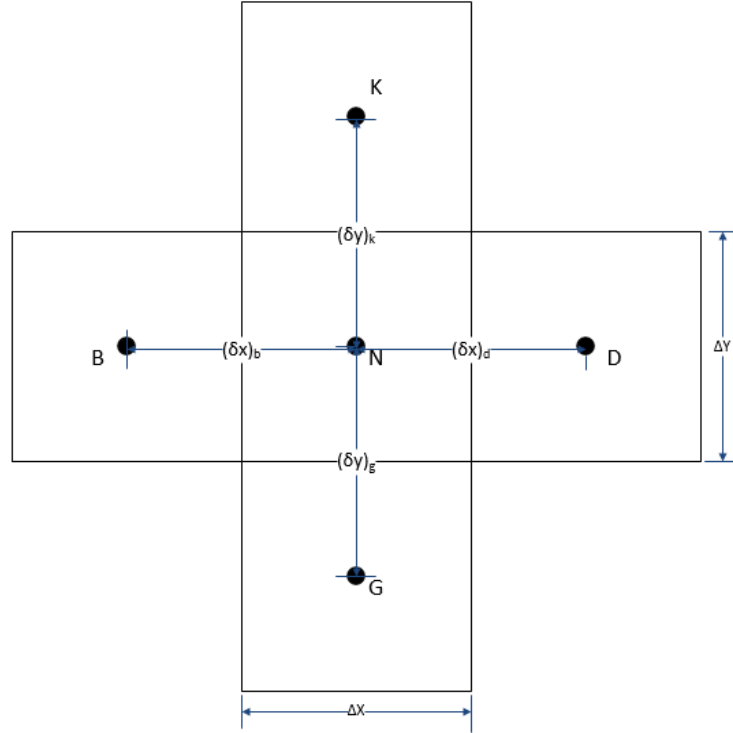
olacaktır. ADI yöntemi denklemin çözümünü denklemin sahip olduğu boyut sayısının bir eksiği kadar adımdan oluşacak şekilde böler. Her bir adım sadece bir boyutu kapalı (implicit) kabul edilir ve diğer boyutlar açık (explicit) olarak yazılır.

Gauss-Seidel yöntemi, Alman matematikçiler Carl Friedrich Gauss and Philipp Ludwig von Seidel tarafından lineer denklem sistemlerini çözmek için kullanılan iterative bir yöntemdir. Biz bu yöntemi SIMPLE algoritmasının içerisinde iki boyutta gözenekli ortam için süreklilik denkleminin çözümünde kullanacağız.

4.2.1 Sonlu hacimler yöntemi

SHY, bütünü belirli sayıda sonlu hacimlere bölerek, kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilen özellikle taşınım-yayılm gibi problemlerin çözümünde kullanılan bir ayrıklaştırma yöntemidir. Sonlu hacim, her bir düğüm noktasını çepeçevre saran ufak hacimli yapıya denir. Bu yöntemde, bütünün sonlu sayıda hacimlere bölünen her bir parçasına korunum denklemleri uygulanır ve hesaplanan değişkenler sonlu hacmin merkezindeki noktada sakladığı değer ile gösterilir.

Akışı yöneten denklemlerin ayrıklaştırılacağı denetim hacmi ve ağ yapısı Şekil 4.6’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : İki boyutlu bir problem için denetim hacmi ve ağ yapısı.

4.2.2 Denklemlerin ayrıştırılması

Bu bölümde SIMPLE algoritması için momentum ve süreklilik denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi ile detaylı bir ayrıştırmasını inceleyeceğiz.

Bütün halde daha önce Denklem 4.4'te gördüğümüz momentum denkleminin, x yönünde ayrıştırma kolaylığı sağlayacak biçimde düzenlenmiş halini Denklem 4.28'de görelim;

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon} \left(u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} \right) = -\epsilon \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + Au + Bu + S \quad (4.28)$$

Burada A ve B ile gösterilen iki terim sırasıyla viskoz sürüklemeyi ve biçim sürüklemelerini temsil eder, S ise kaynak terimidir. Viskoz sürekleme Denklem 4.29'da verilmiştir;

$$A = 180 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu}{d_p^2} \quad (4.29)$$

Biçim sürüklemesi ise Denklem 4.30'da gösterilmiştir;

$$B = 1.8 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho}{d_p} u \quad (4.30)$$

Biçim sürüklemesi hızın karesini içerdiğinden lineer değildir. Burada hız terimlerinin bir tanesini sabit kabul edip bir önceki zaman adımındaki değerini kullanarak sayısal olarak çözülebilir duruma getiriyoruz.

İki terimi toplayıp şu şekilde Denklem 4.31'de gösterebiliriz;

$$G = A + B = 180 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu}{d_p^2} + 1.8 \frac{1 - \epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho}{d_p} u \quad (4.31)$$

J_x ve J_y biçiminde iki değişkeni Denklem 4.32 ve 4.33 tanımlarsak;

$$J_x = \frac{u}{\epsilon} (\rho u) - \mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4.32)$$

$$J_y = \frac{v}{\epsilon} (\rho u) - \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.33)$$

Momentum denkleminin son hali Denklem 4.34'te şöyle olur;

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = -\epsilon \frac{\partial p}{\partial x} + Gu + S \quad (4.34)$$

Şimdi her terimin integralini her sonlu hacim için almamız gerekir, bunlar Denklem 4.35 - 4.40'ta gösterilmiştir;

$$\int \int \int \frac{\partial \rho u}{\partial t} dx dy dt = (\rho u^{n+1} - \rho u^n)_N \Delta x \Delta y \quad (4.35)$$

$$\int \int \int \frac{\partial J_x}{\partial x} dx dy dt = (J_d - J_b) \Delta x \Delta t \quad (4.36)$$

$$\int \int \int \frac{\partial J_y}{\partial x} dx dy dt = (J_k - J_g) \Delta y \Delta t \quad (4.37)$$

$$\int \int \int -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dt = -\varepsilon (p_d - p_b) \Delta y \Delta t \quad (4.38)$$

$$\int \int \int G u dx dy dt = G u^n \Delta x \Delta y \Delta t \quad (4.39)$$

$$\int \int \int S dx dy dt = S \Delta x \Delta y \Delta t \quad (4.40)$$

Kaynak terimini şu şekilde Denklem 4.41'te linearize edelim;

$$S = S_c + S_N u_N \quad (4.41)$$

(Küçük harfler d, b, k ve g ile gösterilen alt indisler sırasıyla doğu, batı, kuzey ve güney arayüzeylerini temsil etmektedirler.)

Denklemimizin çözümü için düzenlenmesi gereken son hali Denklem 4.42'de verilmiştir;

$$a_N u_N^{n+1} = a_D u_D^{n+1} + a_B u_B^{n+1} + a_K u_K^{n+1} + a_G u_G^{n+1} + b - (p_d - p_b) \Delta y \quad (4.42)$$

F ve D olmak üzere iki yeni terim tanımlayalım, Denklem 4.43'te F'in tanımı verilmiştir;

$$F \equiv \frac{\rho u}{\varepsilon} \quad (4.43)$$

Denklem 4.44'te D'nin tanımı verilmiştir;

$$D \equiv \frac{\mu}{\delta x} \quad (4.44)$$

Denklem 4.42'deki katsayılar, denklem 4.45 - 4.48'de gösterilmektedir;

$$a_D = D_d - \frac{F_d}{2} \quad (4.45)$$

$$a_B = D_b + \frac{F_b}{2} \quad (4.46)$$

$$a_K = D_k - \frac{F_k}{2} \quad (4.47)$$

$$a_G = D_g + \frac{F_g}{2} \quad (4.48)$$

Noktanın katsayısı (a_N) Denklem 4.49'de verilmiştir;

$$a_N = a_D + a_B + a_K + a_G + (F_d - F_b + F_k - F_g) + \rho a_N^0 - G \Delta x \Delta y - S_N \Delta x \Delta y \quad (4.49)$$

Burada süreklilikten $(F_d - F_b + F_k - F_g) = 0$.

Patankarın taşınım-yayılmı problemine uygun biçinde gerekli işlemler yapılarak Denklem 4.42'nin tüm katsayıları Denklem 4.50 - 4.56'de gösterilmiştir [35];

$$a_D = D_d A(|Pe_d|) + \|-F_d, 0\| \quad (4.50)$$

$$a_B = D_b A(|Pe_b|) + \|F_b, 0\| \quad (4.51)$$

$$a_K = D_k A(|Pe_k|) + \|-F_k, 0\| \quad (4.52)$$

$$a_G = D_g A(|Pe_g|) + \|F_g, 0\| \quad (4.53)$$

$$a_N = a_D + a_B + a_K + a_G + \rho^n a_N^0 - G \Delta x \Delta y - S_N \Delta x \Delta y \quad (4.54)$$

$$b = \rho^n a_N^0 u_N^n + S_c \Delta x \Delta y \quad (4.55)$$

$$a_N^0 = \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (4.56)$$

Denklem (4.42)'i çözmek için gerekli tüm katsayılar yukarıda gösterilmiştir. Bu katsayıların içerdikleri terimleri matematiksel olarak ifade edersek;

Denklem 4.44'te tanımlanan D teriminin tüm noktalar için gösterimi Denklem 4.57 - 4.60'ta yapılmıştır.

$$D_d = \mu \frac{\Delta y}{(\delta x)_d} \quad (4.57)$$

$$D_b = \mu \frac{\Delta y}{(\delta x)_b} \quad (4.58)$$

$$D_k = \mu \frac{\Delta x}{(\delta y)_k} \quad (4.59)$$

$$D_g = \mu \frac{\Delta x}{(\delta y)_g} \quad (4.60)$$

Denetim hacmi arayüzeylerindeki akış şiddetleri Denklem 4.61 - 4.67'te gösterilmiştir;

$$F_d = \rho_d u_d \Delta y \quad (4.61)$$

$$F_b = \rho_b u_b \Delta y \quad (4.62)$$

$$F_k = \rho_k v_k \Delta x \quad (4.63)$$

$$F_g = \rho_g v_g \Delta x \quad (4.64)$$

Peclet sayıları Denklem 4.65 - 4.68'de gösterilmiştir;

$$Pe_d = \frac{F_d}{D_d} \quad (4.65)$$

$$Pe_b = \frac{F_b}{D_b} \quad (4.66)$$

$$Pe_k = \frac{F_k}{D_k} \quad (4.67)$$

$$Pe_g = \frac{F_g}{D_g} \quad (4.68)$$

Arayüzeylerdeki hızları Denklem 4.69 - 4.72 yardımı ile hesaplayabiliriz;

$$u_d = f_d u_D + (1 - f_d) u_N \quad (4.69)$$

$$u_b = f_b u_N + (1 - f_b) u_B \quad (4.70)$$

$$v_k = f_k v_K + (1 - f_k) v_N \quad (4.71)$$

$$v_g = f_g v_N + (1 - f_g) v_G \quad (4.72)$$

Arayüzeylerdeki hızlar gibi basınçları da Denklem 4.73 - 4.76 yardımı ile bulabiliriz;

$$p_d = f_d p_D + (1 - f_d) p_N \quad (4.73)$$

$$p_b = f_b p_N + (1 - f_b) p_B \quad (4.74)$$

$$p_k = f_k p_K + (1 - f_k) p_N \quad (4.75)$$

$$p_g = f_g p_N + (1 - f_g) p_G \quad (4.76)$$

Arayüzey değerlerini bulmak için kullanılan terimler Denklem 4.77 - 4.80'de gösterilmiştir;

$$f_d = \frac{(\Delta x)_N}{2(\delta x)_d} \quad (4.77)$$

$$f_b = \frac{(\Delta x)_B}{2(\delta x)_b} \quad (4.78)$$

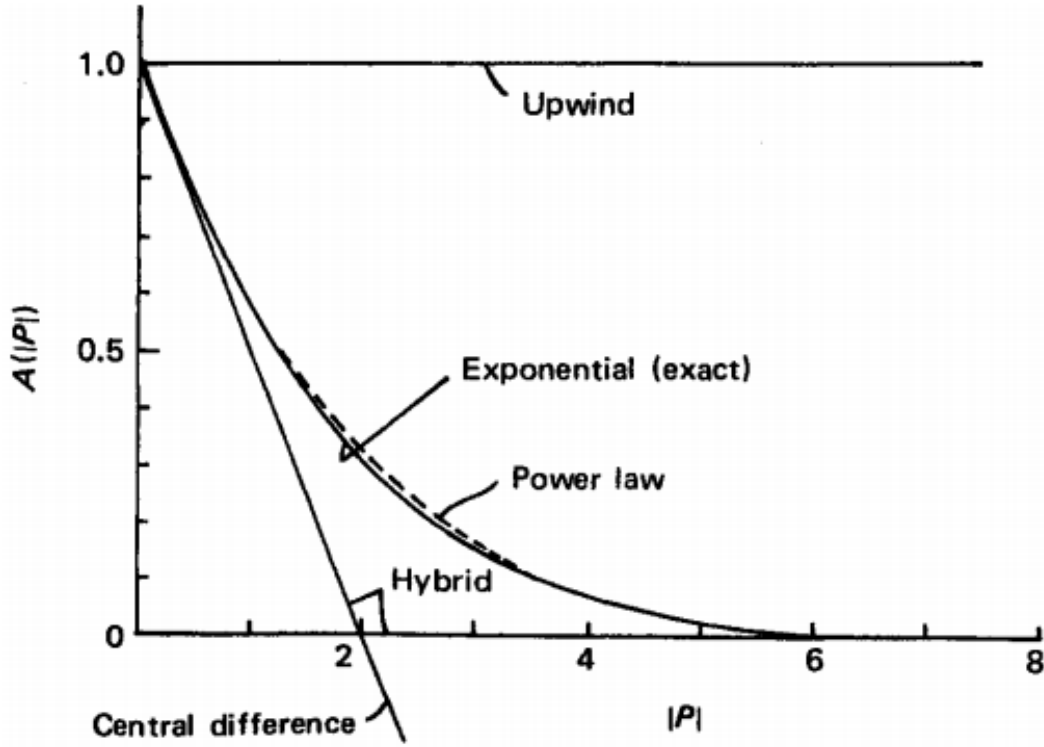
$$f_k = \frac{(\Delta y)_N}{2(\delta y)_k} \quad (4.79)$$

$$f_g = \frac{(\Delta y)_G}{2(\delta y)_g} \quad (4.80)$$

A(|Pe|) işlevi Denklem 4.81'de tanımlanmaktadır;

$$A(|Pe|) = \left\| 0, (1 - 0.1|Pec|)^5 \right\| \quad (4.81)$$

Bu işlev Patankar'ın farklı ayırıştırma şemalarından birisi olan "‘Power Law’" ile adlandırılmaktadır, Şekil 4.7'de farklı ayırıştırma şemaları gösterilmiştir. Görülüyor ki, gerçek sonuca en yakın şema kullanılan "‘Power Law’" şemasıdır.



Şekil 4.7 : Farklı şemalar için $A(|P|)$ fonksiyonu [35].

Bütün terimler gösterildiğine göre artık ayrıklaştırılmış denkleminiz çözülebilir. Daha önce bahsedildiği gibi denkleminiz iki boyutlu olduğu için ADI yöntemi ile iki adımda çözülecektir. İlk adımda yarım zaman adımında x yönünü kapalı (implicit) diğer yani y yönünü açık (explicit) kabul edelim.

Denklem 4.82 ilk adımda çözülecektir;

$$-a_B u_B^{n+1/2} + a_N u_N^{n+1/2} - a_D u_D^{n+1/2} = a_K u_K^n + a_G u_G^n + b - (p_d - p_b) \Delta y \quad (4.82)$$

Sonraki adımda yine yarım zaman adımı için ilk işlemin tersi olacak şekilde, x yönü açık (explicit), y yönü kapalı (implicit) alınacaktır.

Denklem 4.83 ise ikinci adımda çözülecek denklemdir;

$$-a_G u_G^{n+1} + a_N u_N^{n+1} - a_K u_K^{n+1} = a_D u_D^{n+1/2} + a_B u_B^{n+1/2} + b - (p_d - p_b) \Delta y \quad (4.83)$$

Böylelikle bir tam zaman adımı için her noktadaki hız bileşeni hesaplanmış olur.

4.2.3 Basınç düzeltmesi

Aynı ayrıklaştırma iki boyutlu problemimizin diğer hız bileşeni içinde benzer şekilde çözüldükten sonra sıra hız ve basınç düzeltmelerini hesaplamak için süreklilik

denkleminin Gauss sie-del yöntemi ile çö-zölmesine gelir.

Denklem 4.84'te gö-zenekli ortam için süreklilik denklemi gö-sterilmiştir;

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (4.84)$$

Bu denklemin sonlu hacimler yöntemi yardımıyla ayrı-ılaştırılmış hali Denklem 4.85'te verilmiştir;

$$\varepsilon \frac{(\rho_N - \rho_N^0)\Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u)_d - (\rho u)_b]\Delta y + [(\rho v)_g - (\rho v)_k]\Delta x = 0 \quad (4.85)$$

Bu denklemdeki arayüzey hızlarını ve basınçları Denklem 4.86 - 4.87'deki gibi gö-sterabiliriz;

$$u = u^* + u' \quad (4.86)$$

$$p = p^* + p' \quad (4.87)$$

* : Denklem 4.28'in çö-zümü ile hesaplanan dü-zeltilmemiş hız ve basınç değ-erleri

' : Dü-zeltme için kullanılacak değ-erleri gö-stermekte

Arayüzdeki hızları Denklem 4.88 yardımı ile hesaplayabiliriz;

$$a_d u_d = \sum a_{kom} u_{kom} + b - (p_N - p_D)\Delta y \quad (4.88)$$

Kanaldaki basınç dağı-lımı tam olarak bilinmediği için, momentum denklemini çö-zerek eldi ettiğimiz hız değ-erleri süreklilik denklemini tam olarak sağ-lamaz. Tahmini basınç p^* dağı-lımı ile elde ettiğimiz hızlar dü-zeltilmemiş u^* , v^* hız değ-erlerimizdir. Hesaplanmış arayüzey hız değ-erlerini Denklem 4.89 ile bulabiliriz;

$$a_d u_d^* = \sum a_{kom} u_{kom}^* - (p_N^* - p_D^*)\Delta y \quad (4.89)$$

Denklem 4.88'dan Denklem 4.89'yı çıkartırsak, dü-zeltme değ-erlerini bulmak için gerekli Denklem 4.90'a geçebiliriz;

$$a_d u_d' = \sum a_{kom} u_{kom}' + b - (p_N' - p_D')\Delta y \quad (4.90)$$

Şimdi $\sum a_{kom} u_{kom}^*$ terimini düş-ürürsek, hız dü-zeltme değ-erlerimizi Denklem 4.91'de gö-rebiliriz;

$$a_d u_d' = (p_N' - p_D')\Delta y \quad (4.91)$$

$d_d = \frac{\Delta y}{a_d}$ tanımı yardımı ile son hız düzeltme değerlerimiz Denklem 4.92’de verilmiştir;

$$u'_d = d_d(p'_N - p'_D) \quad (4.92)$$

Arayüzey hız değerleri Denklem 4.93 - 4.96’da gösterilmiştir;

$$u_d = u_d^* + \left(\frac{\Delta y}{a_N} \right)_d (p'_N - p'_D) = u_d^* + d_d(p'_N - p'_D) \quad (4.93)$$

$$u_b = u_b^* + \left(\frac{\Delta y}{a_N} \right)_b (p'_B - p'_N) = u_b^* + d_b(p'_B - p'_N) \quad (4.94)$$

$$v_k = v_k^* + \left(\frac{\Delta x}{a_N} \right)_k (p'_N - p'_K) = v_k^* + d_k(p'_N - p'_K) \quad (4.95)$$

$$v_g = v_g^* + \left(\frac{\Delta x}{a_N} \right)_g (p'_G - p'_N) = v_g^* + d_g(p'_G - p'_N) \quad (4.96)$$

Şimdi ayrıklaştırılmış süreklilik denkleminde bu hız değerlerini yerine koyduktan sonra, bilinmeyen p' değerlerini bulmak için Denklem 4.97’yi çözmeliyiz;

$$a_N p'_N = a_D p'_D + a_B p'_B + a_K p'_K + a_G p'_G + b \quad (4.97)$$

Denklem 4.97’de bilinmeyenlerin önündeki katsayılar Denklem 4.98 - 4.103’te verilmiştir;

$$a_D = \rho_d d_d \Delta y \quad (4.98)$$

$$a_B = \rho_b d_b \Delta y \quad (4.99)$$

$$a_K = \rho_k d_k \Delta x \quad (4.100)$$

$$a_G = \rho_g d_g \Delta x \quad (4.101)$$

$$a_N = a_B + a_D + a_K + a_G \quad (4.102)$$

$$b = \varepsilon \frac{(\rho_N^0 - \rho_N) \Delta x \Delta y}{\Delta t} + (\rho_b u_b^* - \rho_d u_d^*) \Delta y + (\rho_g v_g^* - \rho_k v_k^*) \Delta x \quad (4.103)$$

Her iki sayısal yöntemle bulduğumuz sonuçlara yetersiz rahatlama uygulanması gerekebilir. Denklem 4.104’te yetersiz rahatlama uygulamasının nasıl yapıldığı gösterilmektedir,

(X) herhangi bir değişken ve (w) yetersiz rahatlama kastyamız olsun;

$$X_N^{n+1} = (1 - w) X_N^n + (w) X_N^{n+1} \quad (4.104)$$

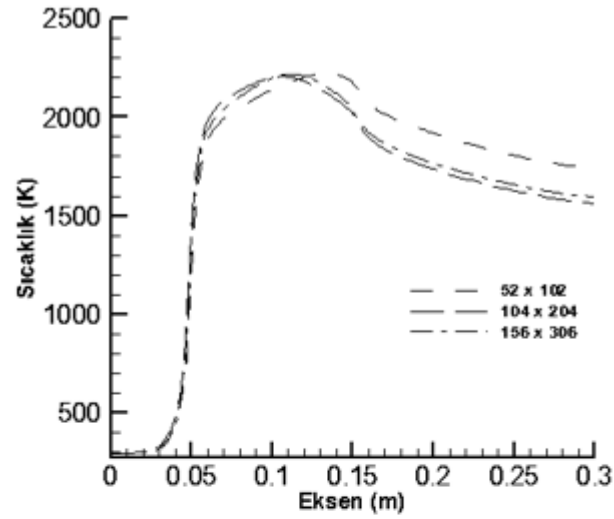
SIMPLE algoritmasının sırasıyla adımlarını görelim;

- Tüm alanda basınç ve hız için öngörüle bulunulur u^* , v^* , p^* .
- -x ve -y yönündeki momentum denklemleri çözülerek, u^* ve v^* hız bileşenleri bulunur, Denklem 4.2
- Arayüzeylerdeki hız değerleri bulunur, Denklem 4.69 - 4.72.
- Süreklilik denklemi yardımıyla basınç düzeltme değerleri hesaplanır ve bunlar yardımıyla gerçek arayüzey hız değerleri bulunur, Denklem 4.93 - 4.96
- Karışım kesiri Denklem 4.5, gaz enerjisi Denklem 4.8 ve katı sıcaklığı Denklem 4.10 denklemleri çözülüp, scalar dağılım oranı 4.7 ve entalpi noksanlığı 4.9 bulunur ve tablolardan gaz fazının sıcaklık ve yoğunluk gibi özellikleri okunur.
- Sonuçların yakınsayıp yakınsamadığına bakılır ve yakınsama sağlanmadıysa yeni bulunan hız ve basınç değerleri ile ikinci adıma geri gidilir ve bu işlem yakınsama sağlanana kadar devam ettirilir.

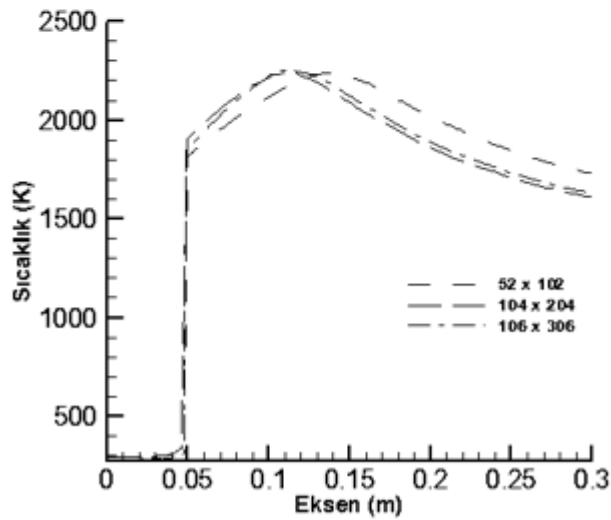
5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Çalışmamızın kapsamında iki boyutlu gözenekli bir kanal içinde akış incelenmiş ve laminar flamelet yaklaşımı ile yanma modellenerek kanal içerisinde katı ve gaz faz arasında ısıl dengenin olmadığı kabulü ile enerji denklemleri çözülmüştür.

Şekil 5.1’de farklı sayıda sonlu hacim içeren çözüm ağları için kanal ortasında katı ve gaz sıcaklıklarının değişimi gösterilmiştir.



(a) Katı Sıcaklığı



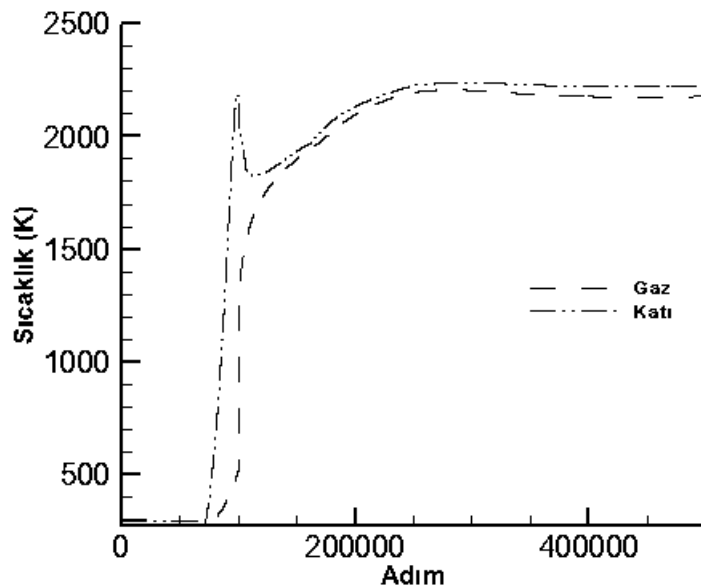
(b) Gaz Sıcaklığı

Şekil 5.1 : Farklı sayıda hacim içeren çözüm ağları için kanal ortasında sıcaklığın değişimi.

İlk olarak programımızın çözüm ağından bağımsız çalıştığını göstermemiz gerekir. Bunun için bir karşılaştırma yapmamız gerekmektedir. Literatürde benzer bir çalışmadan yola çıkarak farklı sayıda sonlu hacim içeren çözüm ağları için sonuç elde edilmiş ve bu sonuçların dikey yönde kanal ortasındaki eksenlerinde katı ve gaz sıcaklıkları karşılaştırılmıştır.

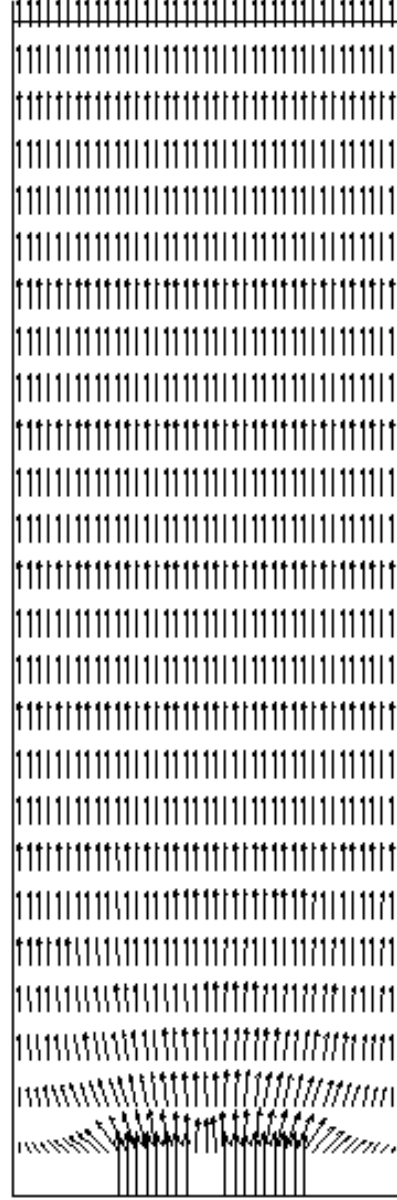
Karşılaştırma yapılmak için oluşturulan çözüm ağları şu şekildedir, 52×102 , 104×204 ve 156×306 . En yüksek sayıda sonlu hacime sahip çözüm ağına göre karşılaştırıldığında, en düşük sonlu hacime sahip çözüm ağının (52×102) hatası yüzde 7.85 ve diğer çözüm ağının (104×204) hatası yüzde 2.45 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar ile yüzde 2.25 hatanın kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunduğu ve dolayısıyla problemimiz için 104×204 sonlu hacimden oluşan çözüm ağının yeterli olduğuna karar verilmiştir. Şekil 5.1'den de görüldüğü gibi 104×204 ve 156×306 çözüm ağları için kanal ortasında dikey yöndeki ekseninde sıcaklıkların değişimi birbirleri ile benzerlik göstermektedir. Sonuç olarak, tüm bunlardan yola çıkarak, programımızın çözüm ağından bağımsız çalıştığını söyleyebiliriz.

Çözüm ağını kontrol eden denklemleri zamana bağlı olarak çözmüştük ama çalışma kapsamında gösterilecek sonuçlar çözümün artık zamandan bağımsız olduğu an için verilmiştir. Çözümün zamandan bağımsız olduğunu göstermek için kanalın tam orta noktasında hem katı hem gaz sıcaklıkları çözüm süresince depolanmıştır ve grafik haline getirilerek Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Kanalın orta noktasındaki sıcaklık değerinin zamanla değişimi.

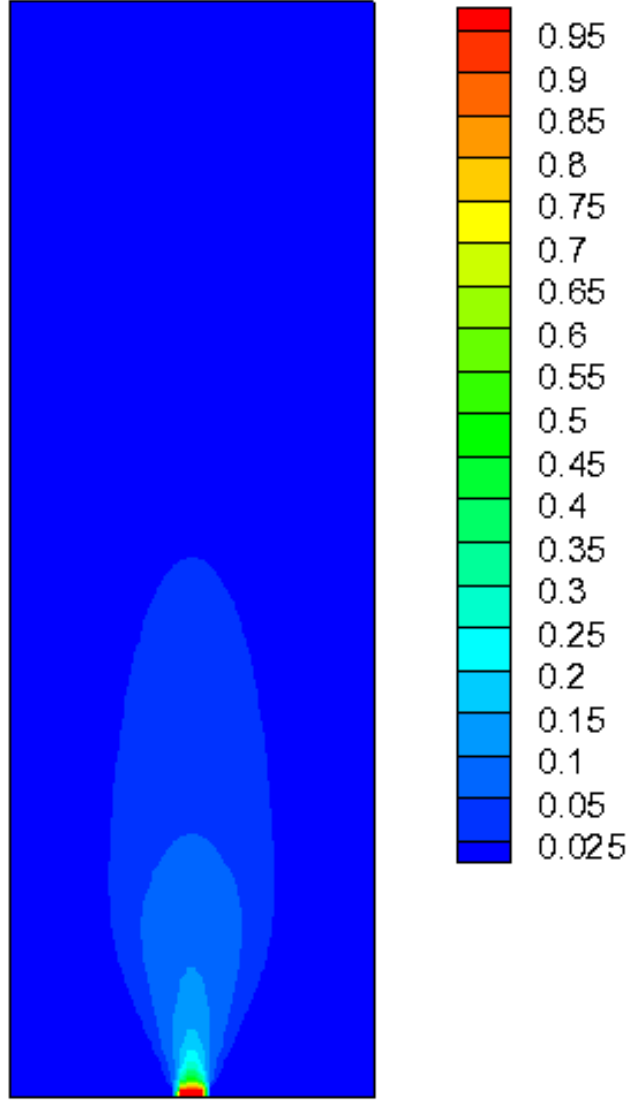
Kanal içerisinde iki boyut için momentum denklemlerini çözerek elde ettiğimiz hız vektörlerini Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Bu vektörlerden yakıt ve hava girişlerinden itibaren kanal içerisinde nasıl bir hız profili oluştuğunu görebiliyoruz. Kullandığımız gözenekli ortamların ortalama gözenek çapının küçük olmasından dolayı geçirgenlikleri bir hayli düşüktür. Bu yüzden ki görüldüğü gibi, girişten kısa bir mesafe sonra hız profili iki duvar arasında eşit ve düz bir görünüm sergilemektedir.



Şekil 5.3 : Kanal içerisinde hız vektörleri.

Şekil 5.4’de karışım kesrinin dağılımı gösterilmektedir, karışım kesri için tüm duvarlarda simetri sınır koşulu uygulanırken, giriş sınırlarına yakıt için "1" ve hava için "0" değerleri verilmişti. Bu şekilde, hava girişleri belli olmasada kanal ortasındaki yakıt girişi görülebiliyor. Kanal içerisinde ilerledikçe karışım kesrinin

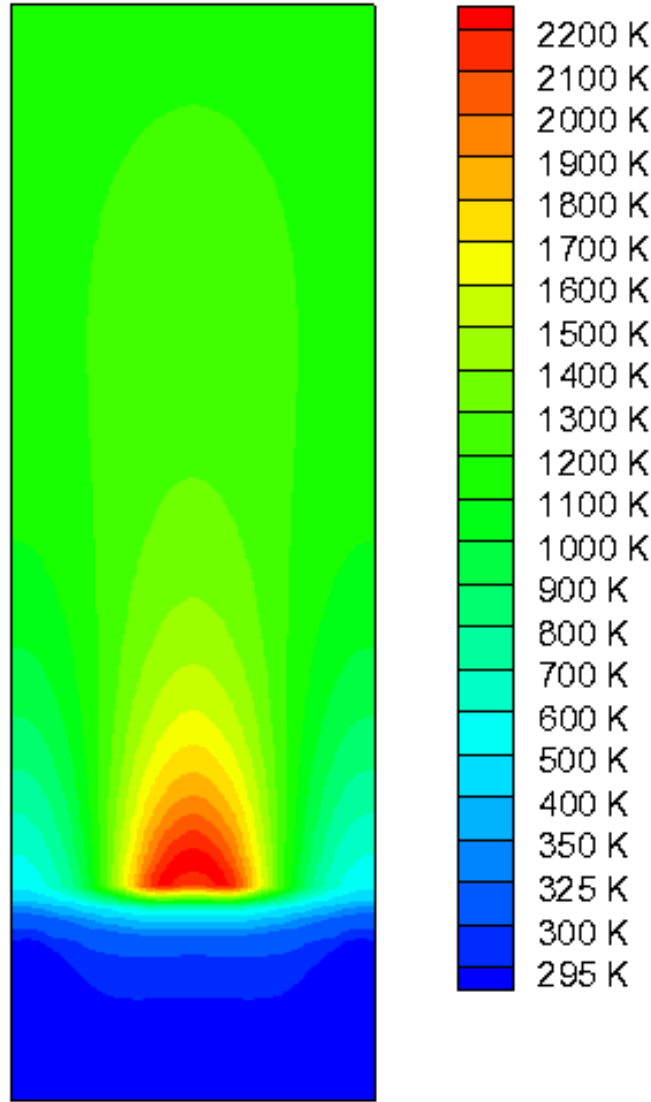
mum alevi şekline benzer bir dağılım yaptığını görüyoruz. Bilindiği gibi bu değişken ile ön-işlem sürecinde oluşturulan adyabatik olmayan flamelet tablolarından kanal içerisindeki gaz sıcaklığını skaler dağılım oranı ve entalpi noksanlığı parametrelerini de göz önünde bulundurarak 3 boyutlu interpolasyon ile bulabileceğiz. Bu tablolardan gaz fazının sıcaklığının yanı sıra, aynı zamanda bu fazın yoğunluğu ile öz ısı gibi özellikleri ve gaz karışımını oluşturan türleri mol kesirleride aynı şekilde hesaplanabilmektedir.



Şekil 5.4 : Kanal içerisinde karışım kesrinin dağılımı.

Şekil 5.5’de kanal içerisindeki gaz fazının sıcaklık dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılıma göre kanal içerisindeki en yüksek sıcaklık değeri yaklaşık $2200K$ olarak görülmektedir. Bilindiği gibi 3 farklı gözenekli ortamdan oluşan kanalın ilk bölümü, yanmanın tutunabilileceği kritik çaptan daha küçük bir ortalama gözeneklilik çapına sahip bir malzemeden oluşturulmuştur. Bu durumdan dolayı aynı şekilde görüldüğü

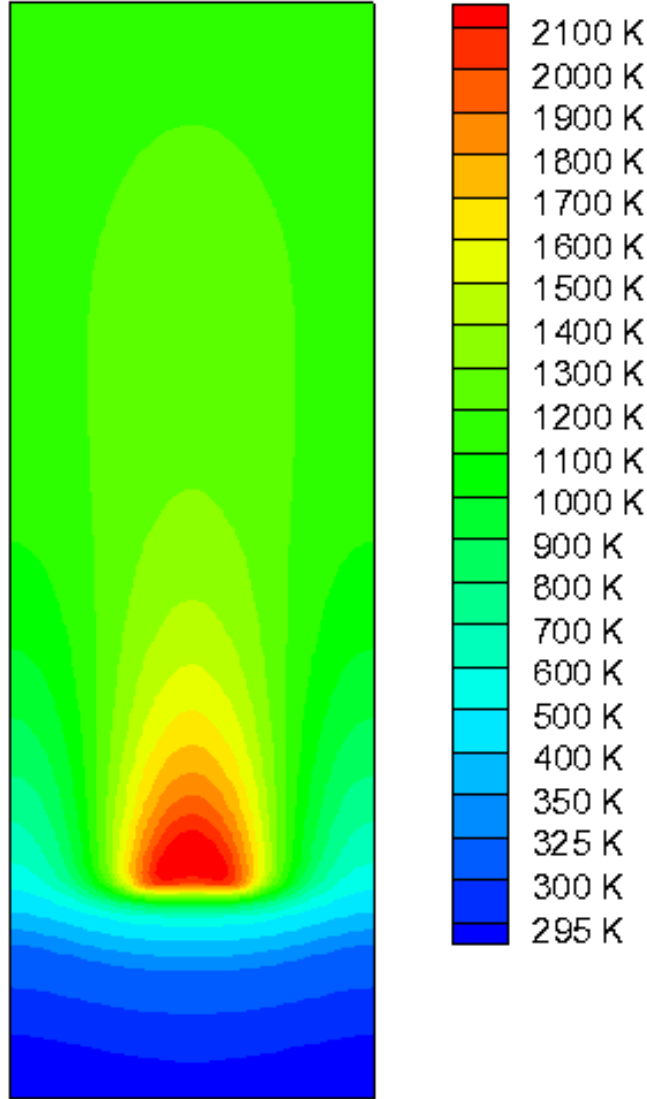
gibi girişten hemen sonraki bölümde yanma meydana gelememiş ve beklenildiği gibi yakıt ve havanın sıcaklıkları yanmanın meydana geleceği bölüme geçerken giriş sıcaklıklarından bir miktar artış göstermiştir.



Şekil 5.5 : Kanal içerisinde gaz sıcaklığının dağılımı.

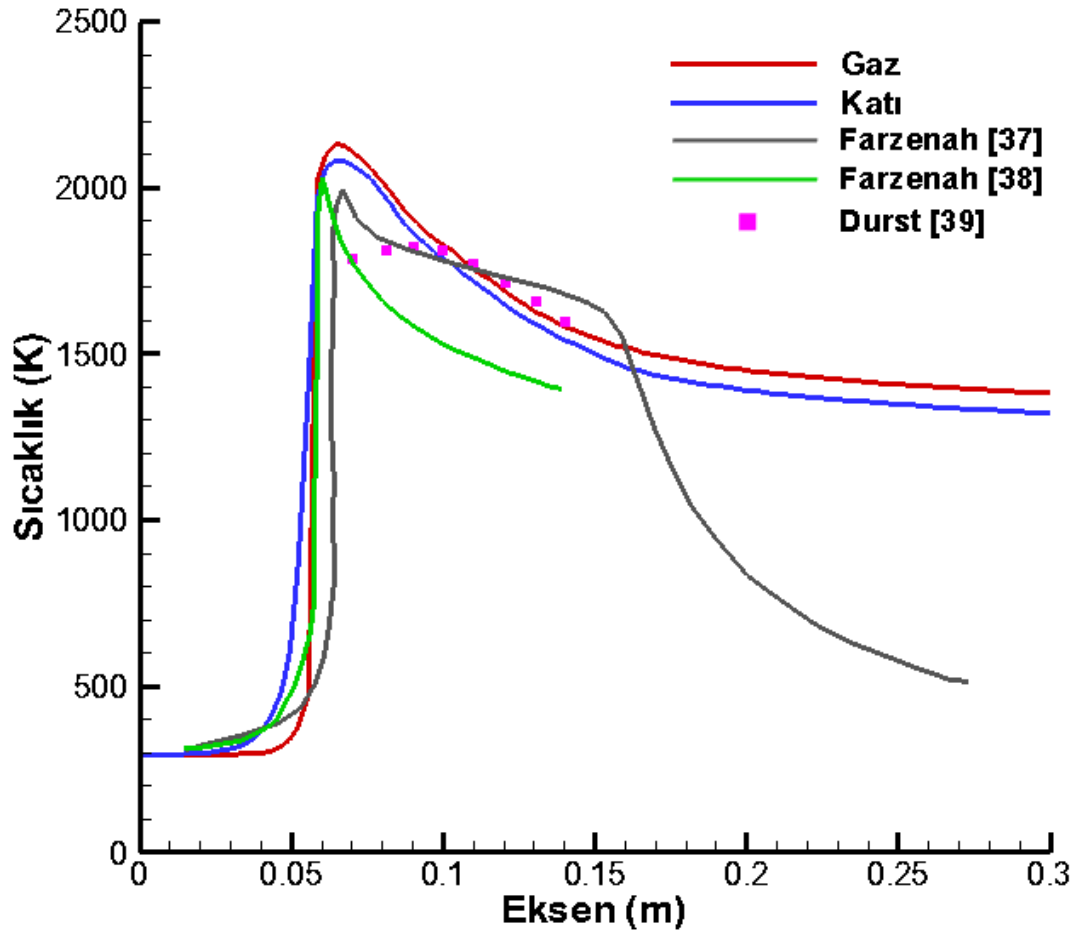
Şekil 5.6'de ise kanal içerisinde gözenekli ortamı oluşturan katı fazın sıcaklık dağılımı verilmiştir. Görülen maksimum sıcaklık değeri yaklaşık 2100K olmakla beraber, beklenildiği gibi ikinci bölümün hemen ilerisinde yanmanın meydana geldiği bölgededir. Aynı zamanda hatırlanacağı gibi üç bölümden oluşan kanalımızın ortalama gözeneklilik çapı girişten itibaren her bölgede artış göstermektedir, hacimsel ısı taşınım katsayısının gözeneklilik çapının karesi ile ters orantıda olması, artan gözeneklilik çapı ile üçüncü bölgede gaz ve katı faz arasındaki taşınım ile ısı transferi azalmıştır. Burada önemli olan diğer bir nokta gözenekli ortamda yanmanın temel

prensiblerinden biri olan hava ve yakıtın yanmadan önce sıcaklıklarının artmasını sağlamak için arzu edilen, sıcaklığın ikinci bölümden ilk bölüme iletim yolu ile aktarıldığının sağlandığının görülmesidir.



Şekil 5.6 : Kanal içerisinde katı sıcaklığının dağılımı.

Kanal içerisinde sıcaklık dağılımlarını inceledikten sonra şimdi kanal ortasında dikey eksende bulduğumuz gaz sıcaklığını daha önceden yapılmış çalışmalar ile karşılaştıracamız. Şekil 5.7’de kanalın ortasında dikey yönde katı ve gaz fazının değişimi görülmektedir. İkinci bölümün hemen başında katı sıcaklığının gaz sıcaklığından daha yüksek olduğunu görülmektedir, bu durum yanmanın super-adyabatik olarak gerçekleştiğini anlatır. Biz bunun olabileceğini literatür çalışmalarından öngörerek, pozitif entalpi noksanlığında da flamelet çizelgerini oluşturmuştuk [36]. Kanalın sonuna doğru katı ve gaz fazları arasındaki sıcaklık farkının artmasının sebebi, ortalama gözeneklilik çapının son bölümde orta bölüme nazaran daha yüksek olması



Şekil 5.7 : Kanalın ortasında dikey ekseninde gaz ve katı faz sıcaklıkları.

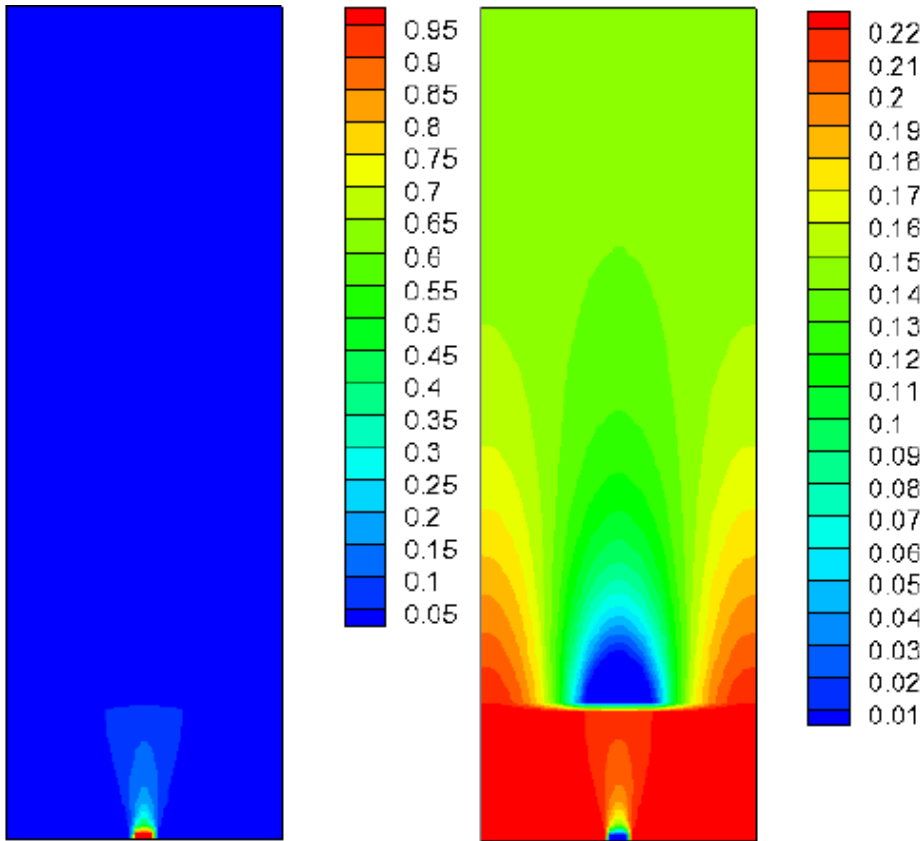
ve dolayısıyla hacimsel ısı taşınım katsayısının azalmasıyla gaz fazından katı fazına transfer edilen enerji miktarı düşüşe uğramıştır. Karşılaştırma için kullanılan verilerin ikisi aynı yazar tarafından 2009 ve 2012 yıllarına ait gözenekli ortamda metan-hava yanmasını konu alan sayısal çalışmalardan iken diğer çalışma 1996 yılına ait aynı konu üzerine yapılan deneysel bir çalışmadandır [37–39].

Karşılaştırılan sayısal çalışmalarda yanmanın kimyası 5 reaksiyon ve 7 tür içeren bir mekanizma ile modellenmiştir ve sonuçlar hava fazlalık katsayısının 1.5 olduğu durumdan alınmıştır. Karşılaştırılan 1996 yılına ait ilk çalışmada kanal iki bölümden oluşmakta iken diğer sayısal çalışmada gözenekli yakıcı üç bölümden oluşmaktadır. Hem sayısal hemde deneysel çalışmada yanma fakir olarak ön-karışimli gerçekleştirilmektedir. Bizim çalışmamızda ise ön-karışimsız difüzyon alevi incelenmektedir. Bu yüzden ki alev cephesinde yanma stokiyometrik olarak gerçekleştiğinden burada oluşan sıcaklık karşılaştırılan çalışmalardan daha yüksek çıkmıştır. 2009 yılına

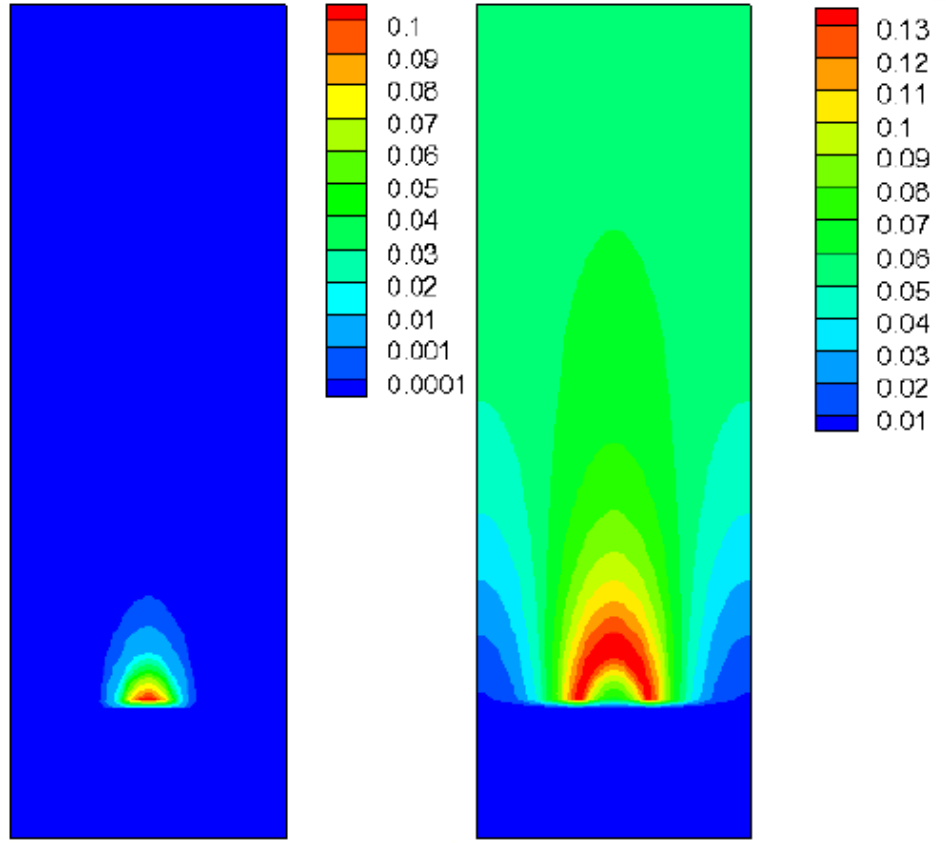
ait sayısal çalışmada yanmanın ön-karışimsız gerçekleştirilmesinden dolayı oluşan sıcaklık farkı belirgin bir şekilde görülmektedir ve bu sıcaklık farkının kanal boyunca korunduğunu görüyoruz. Karşılaştırılan 2012 yılına ait üç bölümden oluşan kanalın sayısal olarak incelendiği diğer çalışmada kanalın son bölümünde gaz sıcaklığındaki büyük düşüşün nedeni, bu çalışmanın üçüncü yani son bölümünde ısı değiştiricilerin kullanılmasıdır.

Karşılaştırılan deneysel çalışmaya geldiğimizde, yanma bölgesinde oluşan sıcaklığın bu çalışmaya ve diğer sayısal çalışmalara nazaran daha düşük olduğu gözlenirken, kanal ilerledikçe deneysel çalışma ile sonuçlarımızın bir biri ile yakından uyum gösterdiklerini söyleyebiliriz.

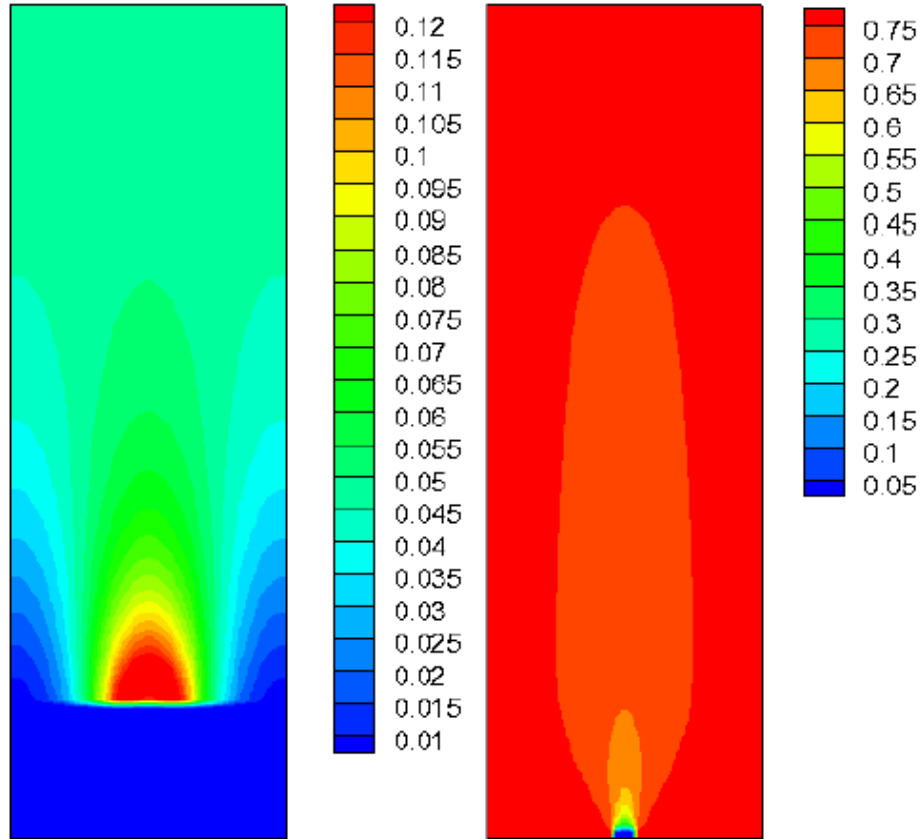
Daha önce bahsedildiği gibi kullandığımız yanma mekanizması (GRI 3.0) 53 tür ve 325 reaksiyondan oluşmaktadır. İstenildiği takdirde çözüm bittikten sonra dahi, her bir türün dağılımı karışım kesri, skaler dağılım oranı ve entalpi noksanlığı parametreleri saklanarak kolaylıkla bulunabilir. Şekil 5.8 - Şekil 5.11’de kanal içerisinde seçilmiş belli başlı türlerin konsantrasyonu görülmektedir.



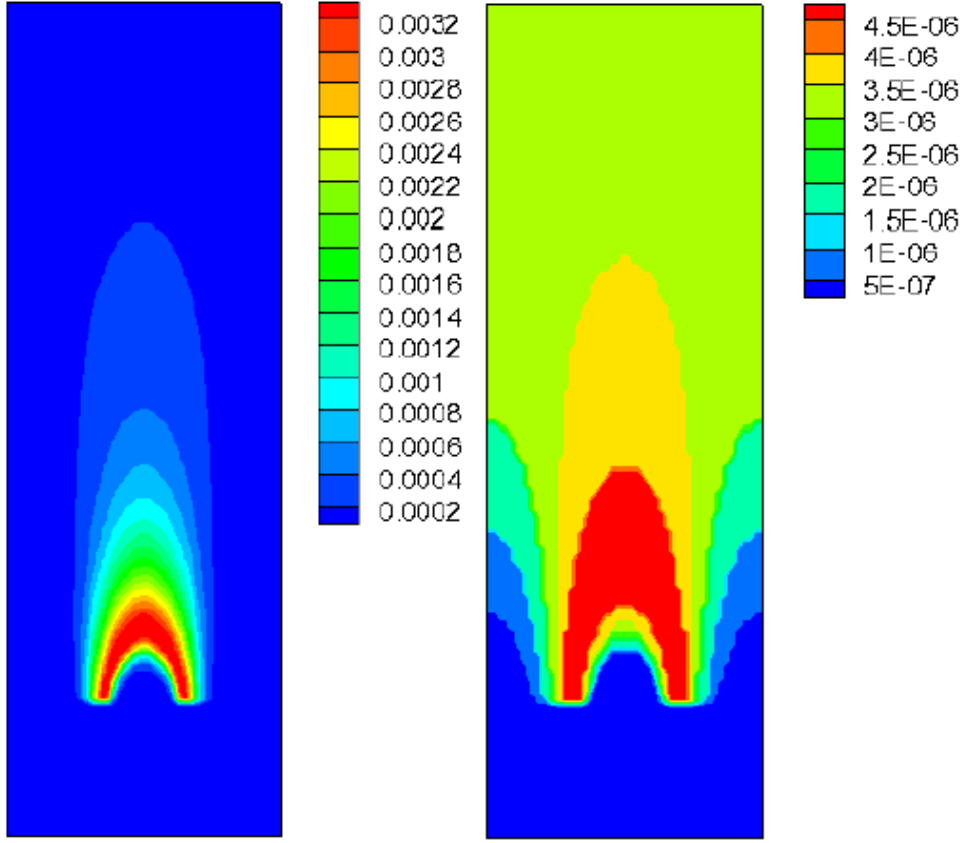
Şekil 5.8 : Kanalın içerisinde soldan sağa CH_4 ve O_2 dağılımı.



Şekil 5.9 : Kanalin içerisinde soldan sağa CO ve CO_2 dağılımı.



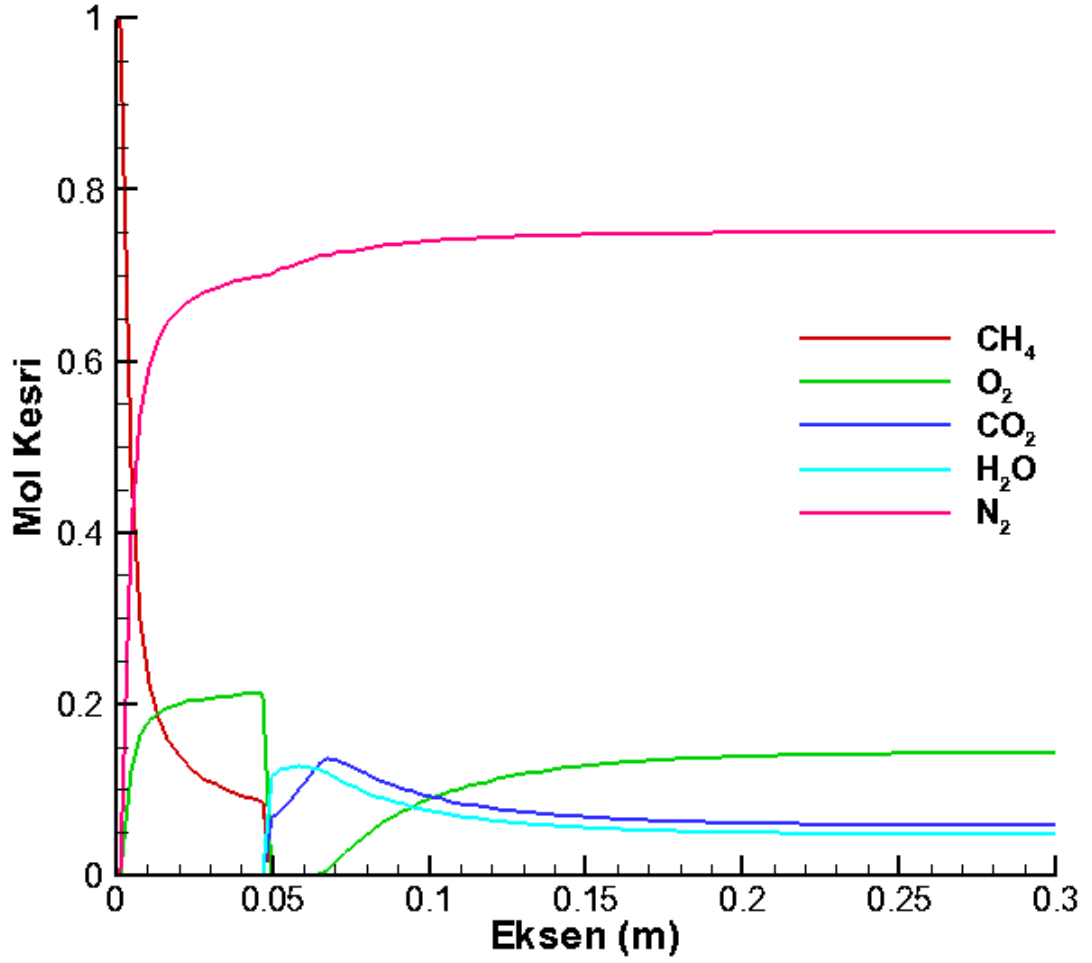
Şekil 5.10 : Kanalin içerisinde soldan sağa H_2O ve N_2 dağılımı.



Şekil 5.11 : Kanalın içerisinde soldan sağa NO ve NO_2 dağılımı.

Gözenekli kanal içerisinde çeşitli türlerin kütle kesirlerinin dağılımları önceki şekillerde verilmiştir. Şekil 5.12’te grafikte ise düşey yönde gözenekli kanalın tam ortasında metan, azot, su buharı ve karbondioksit türlerinin karışım içerisindeki kütle kesirleri gösterilmiştir. Buradan kanalın en başında, ortada saf metanın girdiği yakıt girişi olduğu ve bu girişin yanlarında bulunan girişlerden gelen hava ile yakıtın tepkimeye girerek karbondioksit ve su buharının oluştuğu görülmektedir. Aynı şekil üzerinde ilk bölümün hemen ardından yakıt ve oksijenin konsantrasyonlarının ani bir şekilde düştüğü görülmekte yani tepkimenin nerede başladığı izlenebilmektedir. Konsantrasyonlara bakıldığında yanma bölgesinde oksijenin tamamen tükendiği görülmektedir, bunun nedeni daha önce bahsedildiği gibi yanmanın ön karışimsız gerçekleşmesinden dolayı alev cephesinde yanmanın stokiyometrik olarak gerçekleşmesidir. Yanmanın genel olarak fakir gerçekleşmesinden dolayı, alev cephesinden sonra oksijen konsantrasyonunun tekrar belirgin seviyelere geldiği görülüyor.

Gözenekli ortamda yanmanın en önemli avantajı olarak gaz emisyonlarından sürekli bahsediliyor. Şekil 5.13’te kanal ortasında dikey yönde NO ve CO gazlarının kütle kesirleri verilmiştir.

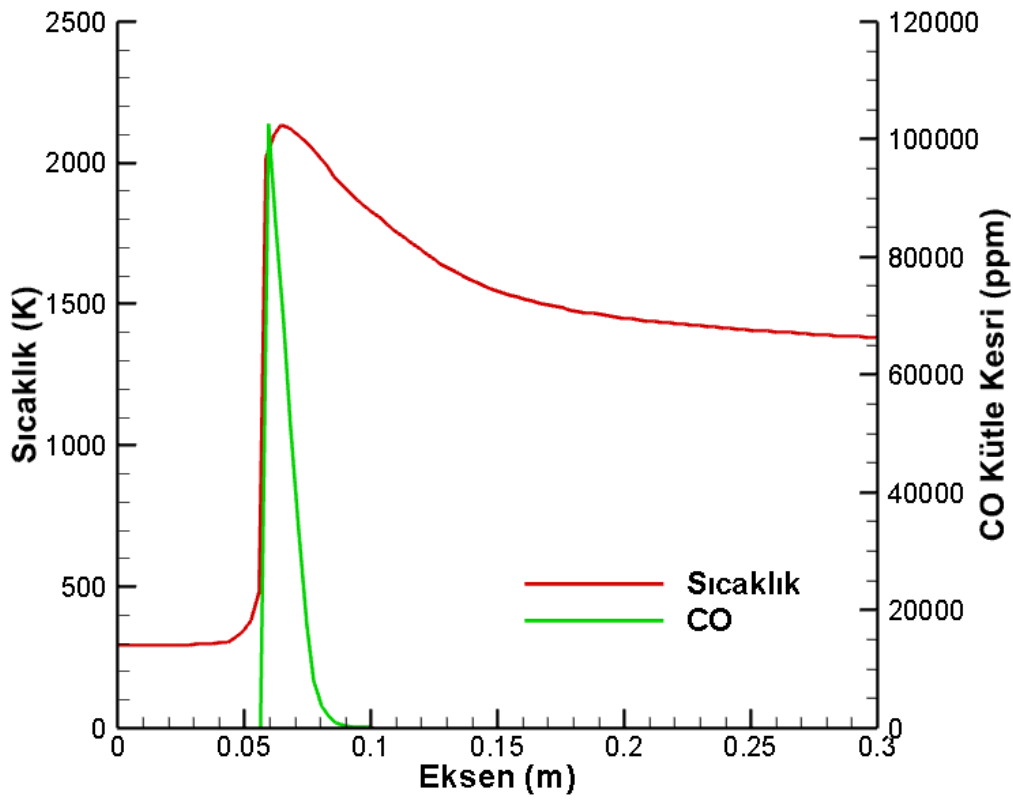
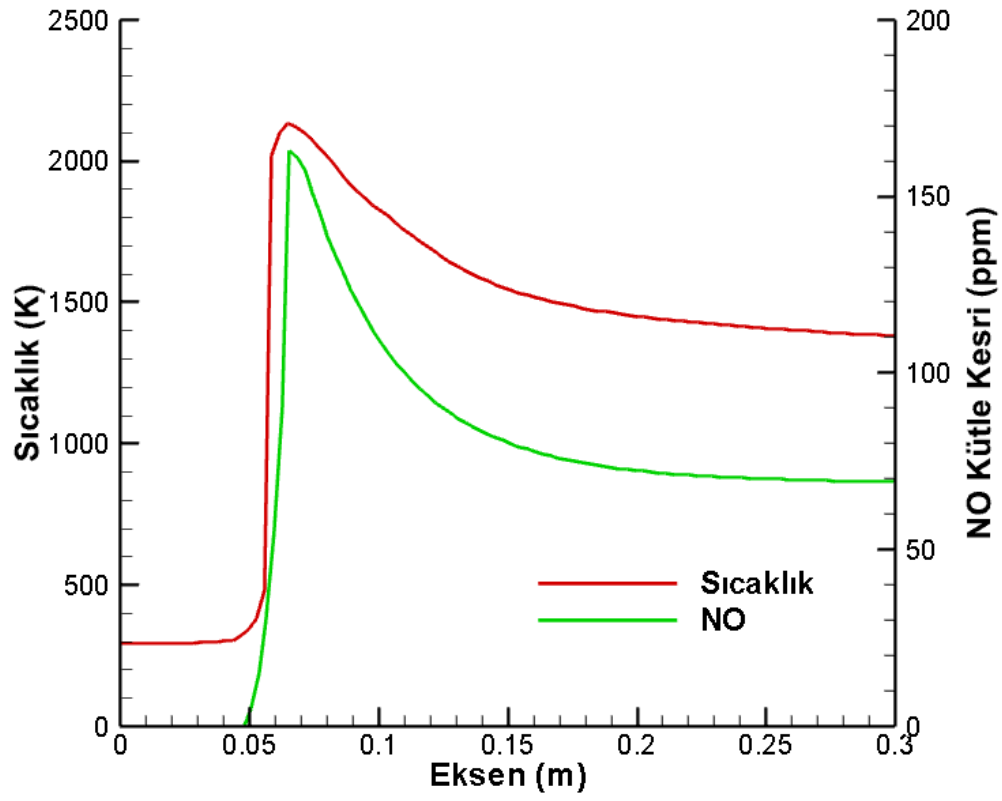


Şekil 5.12 : Kanalin ortasında dikey yönde belirli türlerin dağılımı.

Görülüyor ki, NO oluşumu önemli ölçüde gaz sıcaklığı ile orantılıdır bu yüzden NO oluşumunun büyük bölümü sıcaklığın en yüksek olduğu alev cephesinde gerçekleşiyor. NO oluşumunun yanma bölgesindeki maksimum sıcaklığa bağlı olmasından dolayı NO emisyonunun seviyesini düşürmek için, alev sıcaklığının düşürülmesi gerekir.

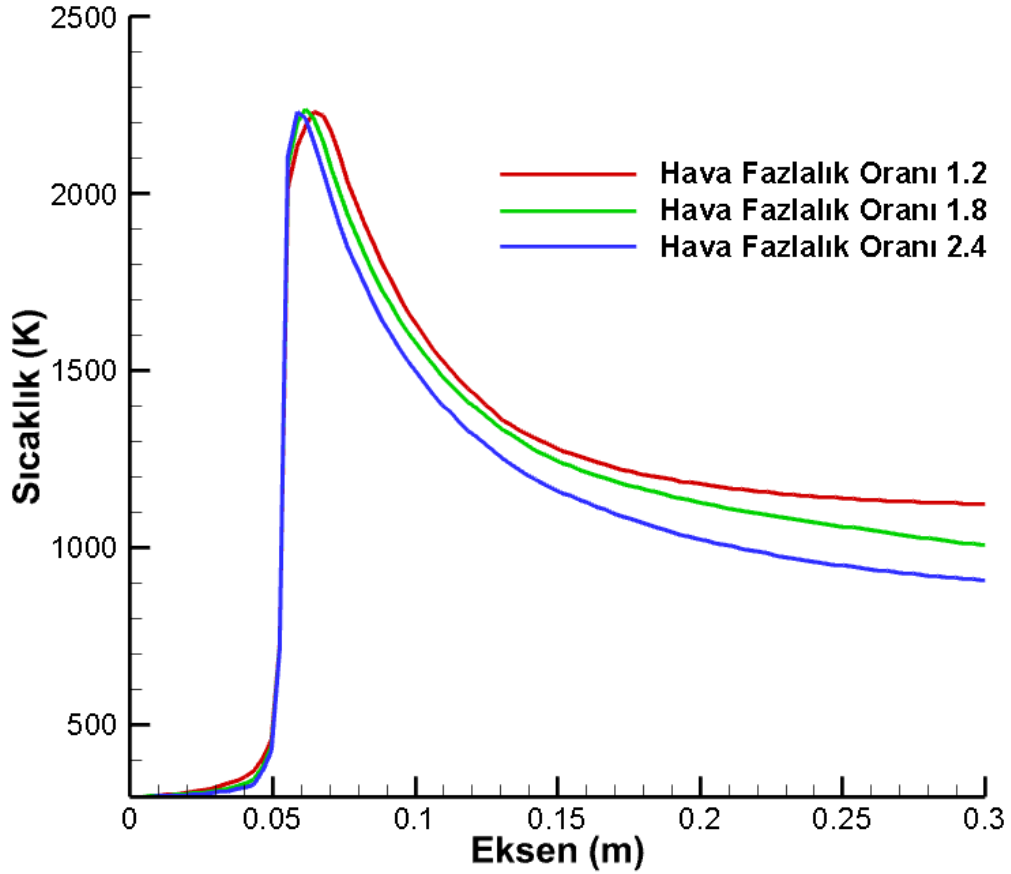
Kanal içerisinde CO emisyonuna baktığımızda, benzer şekilde CH_4 'ün hemen hemen tamamının tüketildiği alev cephesinde en yüksek CO oluşumunun gerçekleştiğini kolaylıkla söylenebilir. Alev cephesinden uzaklaştıkça da karbonmonoksit, karbondioksit'e dönüşüyor.

Hem NO hem CO için elde edilen gaz emisyonları literatürdeki çalışmalar ile benzerlik göstermektedir. Çalışmamızda kanal içerisinde en yüksek NO oluşumunun 175 ppm ve kanalın çıkışındaki NO emisyonunun 88 ppm olduğu görülürken, literatürdeki benzer çalışma gücüne sahip bir çalışmada bu değerler sırasıyla 240 ppm ve 83.5 ppm olarak bulunmuşlardır [40].



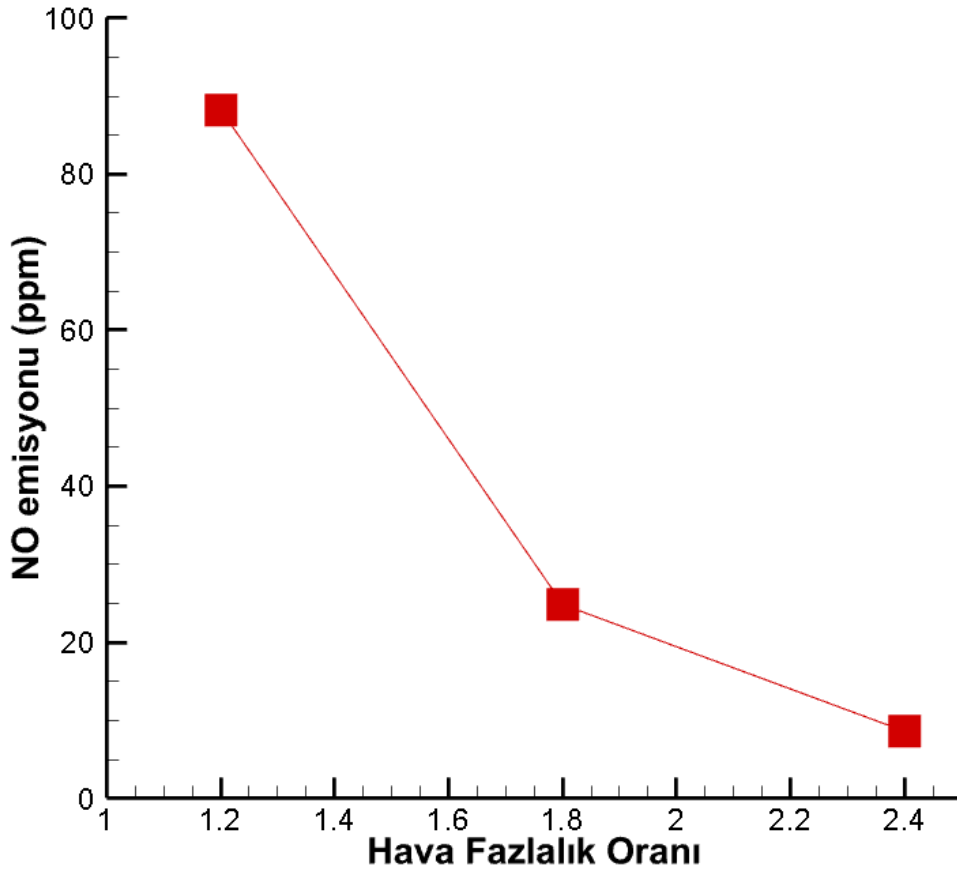
Şekil 5.13 : Kanalın ortasında dikey yönde NO ve CO kütle kesri dağılımları (ppm).

Bundan önceki sonuçların tamamı tek bir çözüme ait iken, şimdi gözenekli yakıcının farklı hava fazlalığı oranlarında nasıl çalıştığını inceleyeceğiz. Bu konu ile ilgili Şekil 5.14’da farklı hava fazlalığı oranları için kanal ortasında düşey yönde gaz sıcaklığının dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Farklı hava fazlalığı oranları için kanal ortasında düşey yönde gaz sıcaklığının dağılımı.

Bu grafikte görüldüğü gibi, hava fazlalık oranı arttıkça gaz karışımının kanal çıkışındaki sıcaklığı azalmaktadır. Bunun nedeni tepkime ile oluşan enerji sabit kalır iken, hava fazlalık oranının yükselmesi ile gaz karışımındaki oksijen ve azot kesirlerinin tepkimeye girmedikleri halde artmasıdır. Açığa çıkan enerji toplam kütle tarafından paylaşılacağından, sıcaklık hava fazlalık oranı ile düşecektir. Aynı şekilde çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise, alev cephesinin hava fazlalık oranının artmasıyla düşey yönde geriye doğru hareket ettiğidir. Literatürde incelenen çalışmalarda, bu benzer durum ile karşılaşmaktadır [38]. Sırada hava fazlalık oranının gaz emisyonları üzerine etkisini inceleyeceğiz. Şekil 5.15 farklı hava fazlalık oranlarında gözenekli yakıcının NO emisyonları gösterilmiştir.



Şekil 5.15 : Farklı hava fazlalığı oranları için gözenekli yakıcının NO emisyonu.

Gaz emisyonlarının sıcaklık ile doğrudan ilişkili olmalarından dolayı, hava fazlalık oranı arttıkça gaz sıcaklığının çıkışa doğru azalması NO emisyonunda azalmasına neden olmuştur.

Çizelge 5.1’de avrupa gaz emisyonları ve farklı hava fazlalık oranları için elde edilen gaz emisyonları gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Avrupa gaz emisyon standartları [41].

	German standard DIN 4702	Swiss standart	German standart "Blauer Engel"	Hamburg promoting program	Hava Fazlalık Oranı		
					1.2	1.8	2.4
NO _x (mg/kW.h)	200	80	60	20	31.1	25.4	7.6
CO (mg/kW.h)	100	60	50	10	1.8	.1.4	9.1

Çalışmamızda yanma verimi, çıkışta metan gazından gelen karbonun karbondioksit oranla hangi oranda karbonmonoksit dönüşüğünü göstermektedir. Verim ifadesi, çıkış boyunca bu iki türün mol kesirlerinin toplanması ve birbirleri ile oranlaması ile

Denklem 5.1'deki gibi gösterilmektedir.

$$Verim = \frac{\sum X_{CO}}{\sum X_{CO_2}} \quad (5.1)$$

İncelenen 3 farklı hava fazlalık oranı için, yanma verimi sürekli yüzde 99 üzerinde bulunmuştur.

5.1 Sonuç

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında eş değer gözeneklilik çapları farklı üç bölgeden oluşan gözenekli bir kanalda yanma iki boyutta sayısal olarak incelenmiştir. Bu inceleme için kanal içerisinde akışı kontrol eden denklemler sonlu hacimler yöntemi ile ayrıklaştırılmıştır. Kanal içerisinde yanma flamelet yaklaşımı ile modellenmiş ve metan ve hava için GRI 3.0 mekanizması kullanılmıştır. Gözenekli ortam için silikon karbidin (SiC) özellikleri kullanılırken, katı ve gaz fazları arasında ısı dengelinin olmadığı göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen sonuçlar,

- Gözenekli ortam için süreklilik ve ağdalı sürüklenme ile biçim sürüklemesi terimlerini içeren momentum denklemleri çözülerek, kanal içerisinde hız dağılımı elde edilmiştir. Kanal içerisinde eşdeğer gözeneklilik çaplarımızın küçük olmasından dolayı, alışılmış açık kanal içerisindeki hız profilinden farklı bir hız profili elde edilmiştir. Bu profil, şekil 5.3'te de görüldüğü gibi, giriş bölümünden kısa bir mesafe sonra, iki duvar arasında her noktada hız sabit bir değere eşit oluyor.
- Gözenekli ortam için karışım kesri denklemi çözülmüş ve dağılımı şekil 5.4'de gösterilmiştir. Bu dağılım yardımıyla kanal içerisinde sıcaklık, tür kesirleri ve bazı akış özellikleri flamelet çizelgelerinden ara değer bulma ile hesaplanmıştır. Böylelikle yanmanın karmaşık kimyası sayısal çözümümüze dahil olmadığı için, yüksek hesaplama gücüne ihtiyaç duyulmamıştır.
- Kanal içerisinde ısı dengesi model kullanılarak katı ve gaz fazları için ayrı ayrı sıcaklık dağılımları bulunmuştur. İlk bölgede eşdeğer gözeneklilik çapının kritik değerden küçük olmasından dolayı, bu bölgede yanma gerçekleşmemiştir. Şekil 5.6'te yanma bölgesinde oluşan ısı bir bölümünün iletim yolu ile katı faz içerisinde ilk bölüme aktarılmasının sağlandığı görülmektedir. Aynı şekilde, şekil 5.5'de birinci bölgede artan katı sıcaklığı ile, yanmamış gazların katı fazdan

taşınım ile ısı aldıkları ve sıcaklıklarının arttığı görülmektedir. Yani çözülen ayrı ayrı çözülen katı ve gaz faz için enerji denklemleri ile yanmış gazlardan yanmamış gazlara ısının geri kazanılması sağlanmıştır.

- Yanma bölgesinde katı sıcaklığının gaz sıcaklığından yüksek olduğu yerler görülmektedir. Bu bölgelerde, entalpi noksanlığı değeri pozitif değerler aldığından yanma super-adyabatik yani ısı alarak gerçekleşmektedir. Biz bu durumu göz önünde bulundurarak, flamelet çizelgelerimizi entalpi noksanlığının pozitif olduğu durumlara göre oluşturmuştuk.
- Yanma verimini incelediğimizde çıkışta karbonmonoksitin, karbondioksit oranını karşılaştırdık ve bu oranın yaklaşık yüzde 99 olduğunu gördük. Bu oran ve Şekil 5.13'dan da görüldüğü gibi gözenekli kanalda karbonmonoksit salımı tahmin edildiği gibi oldukça düşük seviyelerdedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Weinberg, F. ve Spanding, D.** (1971). Combustion Temperatures: The Future?, *Nature*, 233, 239–241.
- [2] **Takeno, T. ve Sato, K.** (1979). An excess enthalpy flame theory, *Combustion Science and Technology*, 20, 73.
- [3] **Takeno, T. ve Sato, K.** (1979). A theoretical and experimental study on an excess enthalpy flame, *7th ICOGER*, Gottingen, Germany.
- [4] **Min, D. ve Shin, H.** (1991). Laminar Premixed Stabilization inside a Honeycomb Ceramic, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34, 341–356.
- [5] **Khanna, V., Goel, R. ve Ellzey, J.** (1994). Measurements of Emissions and Radiation for Methane Combustion with in a Porous Medium Burner, *Combustion Science and Technology*, 99, 133–142.
- [6] **Trimis, D. ve Durst, F.** (1996). Combustion in a porous medium-advances and applications, *Combustion Science and Technology*, 121, 135–168.
- [7] **Howell, J.R., Hall, H.J. ve Ellzey, J.I.** (1996). Combustion of Hydracarbon Fuels Within Porous Inert Media, *Prog. Energy Combustion Sci.*, 22, 121–145.
- [8] **Hsu, P.F., Howell, J.R. ve Matthews, R.D.** (1993). A numerical investigation of premixed combustion within porous inert media, *Journal of Heat Transfer*, 115(3), 744–750.
- [9] **Zhou, X.Y. ve Pereira, J.C.F.** (1997). Numerical study on combustion and pollutions formation in inert non homogenous porous media,, *Combustion Sci. Technol.*, 130, 335–364.
- [10] **Barra, A.J. ve Ellzey, J.L.** (2004). Heat recirculation, heat transfer in porous burners, *Combust. Flame*, 137, 230–241.
- [11] **Smucker, M.T. ve Ellzey, J.L.** (2005). Computational experimental study of two-section porous burner, *Combust. Sci. Technol.*, 176, 1171–1189.
- [12] **Diamantis, D.J., Mastorakos, E. ve Goussis, D.A.** (2002). Simulations of premixed combustion within porous media, *Combust. Theor. Model.*, 6, 383–411.
- [13] **Mishra, S., Steven, M., Nemoda, S., Talukdar, P., Trimis, D. ve Durst, F.** (2006). Heat transfer analysis of a two-dimensional rectangular porous radiant burner, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 33, 467–474.

- [14] **Marbach, T.L. ve Agrawal, A.K.** (2005). Experimental study of surface and interior combustion using composite porous media, *J. Eng. Gas Turb. Power*, 127, 307–313.
- [15] **Vijaykant, S. ve Agrawal, A.K.** (2007). Liquid fuel combustion within silicon-carbide coated carbon foam, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 32, 117–125.
- [16] **Mujeebu, M.A., Abdullah, M.Z., Abu Bakar, M.Z., Mohamad, A.A., Muhad, R.M.N. ve Abdullah, M.K.** (2009). Combustion in porous media and its applications - A Comprehensive survey, *Journal of Environmental Management*, 90, 2287–2312.
- [17] **Dullien, F.** (1992). *Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure.*, Academic Press, Inc. New York.
- [18] **Kaviany, M.** (1995). *Principles of Heat Transfer in Porous Media.*, Springer-Verlag New York.
- [19] **Baytaş, A.** (2015). *Taşınum ile Isı Geçişi*, Nobel Akademik Yayıncılık.
- [20] **Trimis, D.** (2005). Porous Burner in, *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications 2005*, Wiley-VSH, 484–503.
- [21] **Wesclas, M.** (2005). Potential of Porous Medium Combustion Technology as Applied to Internal Combustion Engines, *Special publication series of the Georg-Simon-Ohm University of Applied Sciences*.
- [22] **Dai, H., Lin, B., Ji, K., Wang, C., Li, Q., Zheng, Y. ve Wang, K.** (2015). Combustion characteristics of low-concentration coal mine methane in ceramic foam burner with embedded alumina pellets, *Applied Thermal Engineering*, 90, 489–498.
- [23] **Peters, N.** (1984). Laminar diffusion flamelet models in non-premixed combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, 10, 319–339.
- [24] **Gregory, P.S., David, M.G., Michael, F., Nigel, W.M., Boris, E., Mikhail, G., Thomas, C.B., Ronald, K.H., Soonho, S., William, C.G., Jr Vitali, V.L. ve Zhiwei, Q.**, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/, alındığı tarih: 01.05.2016.
- [25] **Allison, D.**, (1972), Polynomial Approximations of thermodynamic properties of arbitrary gas mixtures over wide pressure and density range [NASA Technical Note], NASA.
- [26] **Wakao, N. ve Kaguei, S.** (1982). *Heat and Mass Transfer in Packed Beds*, Gordon and Breach Science Publisher, London.
- [27] **Younis, L.** Experimental determination of the volumetric heat transfer coefficient between stream of air and ceramic foam, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36(6), 1425–1436.

- [28] **Kuwahara, F., Shirota, M. ve Nakayama, A.** (2001). A numerical study of interfacial convective heat transfer coefficient in two-energy equation model for convection in porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(6), 1153–1159.
- [29] **Rashed, A.H.**, (2002), Properties and characteristics of silicon Carbide, Poco Graphite, Inc.
- [30] **Cloutman, L.** (2000). A Selected Library of Transport Coefficient for Combustion and Plasma Physics Applications, *Lawrence Livermore National Laboratory Report*.
- [31] **Kee, R.J., Rupley, F.M., Miller, J.A., Coltrin, M.E., Grcar, J.F., Meeks, E., Moffat, H.K., Lutz, A.E., Dixon-Lewis, G., Smooke, M.D., Warnatz, J., Evans, G.H., Larson, R.S., Mitchell, R.E., Petzold, L.R., Reynolds, W.C., Caracotsios, M., Steward, W.E., Glarborg, P., Wang, C. ve Ola, A.** (2000). CHEMKIN COLLECTION, *Reaction Design, Inc.*
- [32] **Hayashi, A.K. ve Hishida, M.** (1991). Numerical Study on Pulsed Jet Combustion, *Fourth International Symposium on Combustional Fluid Dynamics*, California, USA.
- [33] **Patankar, S. ve Spanding, D.** A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15, 1787.
- [34] **Peaceman, D.W. ve Rachford Jr., H.H.** The Numerical Solution of Parabolic and Elliptic Differential Equations, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 3(1), 28–41.
- [35] **Patankar, S.** (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation.
- [36] **Hanamura, K., Echigo, E. ve Zhdanok, S.** (1993). Superadiabatic combustion in a porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 3201–3209.
- [37] **Farzaneh, M., Shafiey, M., Ebrahimi, E. ve Mehrzad, S.** (2012). Numerical Investigation of premixed combustion in a porous media burner with integrated heat exchanger, *Heat and Mass Transfer*, 48, 1273–1283.
- [38] **Farzaneh, M., Ebrahimi, R., Shams, M. ve Shafiey, M.** (2009). Numerical simulation of thermal performance of a porous burner, *Chemical Engineering and Processing*, 48, 623–632.
- [39] **Durst, F. ve Trimis, D.** (1996). Compact porous medium burner and heat exchanger for household applications, *EC project report, JOE3-CT95-0019*.
- [40] **Zhou, X.Y. ve Pereira, C.F.** (1997). Numerical study of combustion and pollutants formation in inert nonhomogeneous porous media, *Combustion Science and Technology*, 130, 335–364.

- [41] **Scheffler, M. ve Colombo, P.** (2005). *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications.*, WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA.

EKLER

EK A.1 : Asıl Program

EK A.2 : Çözüm Ağı Oluşturma

EK A.3 : Thomas Algoritması

EK A.4 : Tablolardan Değer Okuma

EK A.5 : Gaz Faz Isıl İletkenlik Katsayısı ve Vizkozite Hesabı

EK A.1

```
PROGRAM BOYUTLUENERJI
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I,J,K,M,N,MM,NN,SAY,MX,NY,KI
INTEGER :: L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8,LL
INTEGER :: HH1,HH2,HH3,HH4,HHH
PARAMETER(M=52,N=102,MM=51,NN=101)
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M):: X,DX,DXB,DXD
REAL(KIND = 8),DIMENSION(N):: Y,DY,DYK,DYG,NU
REAL(KIND = 8),DIMENSION(N):: SUBD,DIAG,SUPERD,D,S
REAL(KIND = 8),DIMENSION(MM):: XB
REAL(KIND = 8),DIMENSION(NN):: YB
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: AD,AB,AK,AG
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: PAD,PAB,PAK,PAG,PAN,PBP
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: SC,SN,DXY,AN0
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: UXSTAR,UXSTARO,UYSTAR,UYSTARO
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: DD,DB,DK,DG
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: PDD,PDB,PDK,PDG
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: FD,FB,FK,FG
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: PD,PB,PK,PG
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: PWD,PWB,PWK,PWG
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: PFD,PFB,PFK,PFG
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: P,PP,PPO,KPD,KPB,KPK,KPG
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: KATSAYILARX,KATSAYILARY
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: BAN,DAN,KAN,GAN,AN
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: UXD-
STAR,UXBSTAR,UYKSTAR,UYGSTAR
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: UXbSTARESK,UXdSTARESK
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: UYkSTARESK,UYgSTARESK
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: UYk,UYg,UXb,UXd
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: UYkESK,UYgESK,UXdESK,UXbESK
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: UXSTARESK,UYSTARESK
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: MIXFRAC,MIXFRACO,TG,TSOL,TSOLO
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: DP,ROD,ROB,ROK,ROG,ROGO,MUV,KGA
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: Dz,DzD,DzB,DzK,DzG,KKK,CPG,CPS
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: DFC,SCDRATE,REYNOLDS,NUV,HV,ENTH
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: KS,MMM,CCC,POR,NABLAZ,ROGG,ENTHO

REAL(KIND = 8)D1,GERXK,GERYK,D2,UGIRIS
REAL(KIND = 8)PDC,PBC,PKC,PGC
REAL(KIND = 8)APD,APB,APK,APG
REAL(KIND = 8)ZERO,A,DT
REAL(KIND = 8)UXRAHAT,UYRAHAT,MFRAHAT,HRAHAT
```

```

REAL(KIND = 8)PPRAHAT,RAHAT,TRAHAT,TSRAHAT
REAL(KIND = 8)PR,HATA,HATAT,GIRIS,CIKIS,FARK,NUO
REAL(KIND = 8)MHATA,THATA,mFHATA,KF,TSHATA,HHATA
REAL(KIND = 8)DP1,DP2,DP3,POR1,POR2,POR3,DMOM,ROGAS
REAL(KIND = 8)ROS,TTG,HO,HF,KG,MU,MUU,KGASS
REAL(KIND = 8)MMM1,MMM2,MMM3,CCC1,CCC2,CCC3,UO,UF,RO
REAL(KIND = 8)BOLTZ,TINF,EMMIS

```

!! TABLO OLUŞTURMA

```

REAL(KIND = 8),DIMENSION(10,11,100)::TABLO,H2,H,O,O2,HT,
*OH,H2O,HO2,H2O2,C,CH,CH2,CH2S,CH3,CH4,CO,CO2,HCO,CH2O,CH2OH,CH3O,
*CH3OH,C2H,C2H2,C2H3,C2H4,C2H5,C2H6,HCCO,CH2CO,HCCOH,NNN,NH,NH2,
*NH3,NNH,NO,NO2,N2O,HNO,CN,HCN,H2CN,HCNN,HCNO,HOCN,HNCO,NCO,N2,AR,
*C3H7,C3H8,CH2CHO,CH3CHO,CPCP,MW,YOGUNLUK

```

```

REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N)::O2O2,N2N2,CO2CO2,H2OH2O,CH4CH4
REAL(KIND = 8)K1,K2,K3,K4,K5
REAL(KIND = 8),DIMENSION(M,N):: CHDORT,OIKI,COIKI,HIKIO,COCOCO,
*NIKI,HIKI,NHUC,NONONO,NOIKI,HTHT

```

```

REAL(KIND = 8),DIMENSION(10)::DEFECT
REAL(KIND = 8),DIMENSION(10,11):: SCDR
REAL(KIND = 8),DIMENSION(10,100)::ZZ
REAL(KIND = 8) ATLA,PAS,ROO,CPGAS

```

```

CHARACTER*10 OUTNVEL
CHARACTER*10 OUTNFRA
CHARACTER*10 OUTNTEM
CHARACTER*10 OUTNTES
CHARACTER*10 OUTNENT
CHARACTER*10 OUTNDFC
CHARACTER*10 OUTNBAS
CHARACTER(LEN=30) :: Format

```

```

COMMON/IN/MU,PR,DT,D1,D2,GERXK,GERYK,UXRAHAT,UYRAHAT,TRAHAT,
*RAHAT,PPRAHAT,MHATA,THATA,UGIRIS,ZERO

```

```

OPEN(UNIT=1,FILE='INPUT.IN')
OPEN(UNIT=2,FILE='OUT.OUT')
OPEN(UNIT=3,FILE='xTS SIRALI.dat')
OPEN(UNIT=4,FILE='xTG SIRALI.dat')
OPEN(UNIT=5,FILE='xFRAC SIRALI.dat')
OPEN(UNIT=6,FILE='xHIZ.dat')
OPEN(UNIT=7,FILE='xSCDRATE.dat')
OPEN(UNIT=8,FILE='xTEMGAS.dat')
OPEN(UNIT=9,FILE='xDFC.dat')

```



```

OPEN(UNIT=10,FILE='xP.dat')
OPEN(UNIT=11,FILE='xTEMSOL.dat')
OPEN(UNIT=12,FILE='xHV.dat')
OPEN(UNIT=13,FILE='xHIZ SIRALI.dat')
OPEN(UNIT=14,FILE='xZAMANLA.dat')
OPEN(UNIT=15,FILE='xFRAC.dat')
OPEN(UNIT=16,FILE='xORTAsıcaklık.dat')
OPEN(UNIT=17,FILE='xHT.DAT')
OPEN(UNIT=18,FILE='xORTAturler.DAT')
OPEN(UNIT=19,FILE='KGAS.DAT')
OPEN(UNIT=20,FILE='MUG.DAT')

```

```

OPEN(UNIT=30,FILE='TURKESITLERI/CH4.DAT')
OPEN(UNIT=31,FILE='TURKESITLERI/O2.DAT')
OPEN(UNIT=32,FILE='TURKESITLERI/CO2.DAT')
OPEN(UNIT=33,FILE='TURKESITLERI/H2O.DAT')
OPEN(UNIT=34,FILE='TURKESITLERI/CO.DAT')
OPEN(UNIT=35,FILE='TURKESITLERI/N2.DAT')
OPEN(UNIT=36,FILE='TURKESITLERI/NO.DAT')
OPEN(UNIT=37,FILE='TURKESITLERI/NO2.DAT')

```

```

HATA=1.0
FARK=10.0
MX=M
NY=N

```

```

CALL INPUT(MX,NY)
CALL GERX(M,MM,X,XB,D1,GERXK)
CALL GERY(N,NN,Y,YB,D2,GERYK)

```

```

OPEN(UNIT=211,FILE='tablo35050-0.csv')
OPEN(UNIT=210,FILE='tablo35050-10.csv')
OPEN(UNIT=209,FILE='tablo35050-20.csv')
OPEN(UNIT=208,FILE='tablo35050-35.csv')
OPEN(UNIT=207,FILE='tablo35050-50.csv')
OPEN(UNIT=206,FILE='tablo35050-60.csv')
OPEN(UNIT=205,FILE='tablo35050-65.csv')
OPEN(UNIT=204,FILE='tablo35050-70.csv')
OPEN(UNIT=203,FILE='tablo35050-75.csv')
OPEN(UNIT=202,FILE='tablo35050-77.csv')
OPEN(UNIT=201,FILE='tablo35050-78.csv')
OPEN(UNIT=222,FILE='tablo25050-0.csv')
OPEN(UNIT=221,FILE='tablo25050-10.csv')
OPEN(UNIT=220,FILE='tablo25050-20.csv')
OPEN(UNIT=219,FILE='tablo25050-30.csv')
OPEN(UNIT=218,FILE='tablo25050-40.csv')
OPEN(UNIT=217,FILE='tablo25050-45.csv')

```

```

OPEN(UNIT=216,FILE='tablo25050-50.csv')
OPEN(UNIT=215,FILE='tablo25050-54.csv')
OPEN(UNIT=214,FILE='tablo25050-57.csv')
OPEN(UNIT=213,FILE='tablo25050-59.csv')
OPEN(UNIT=212,FILE='tablo25050-60.csv')

```

```

OPEN(UNIT=233,FILE='tablo15050-0.csv')
OPEN(UNIT=232,FILE='tablo15050-10.csv')
OPEN(UNIT=231,FILE='tablo15050-20.csv')
OPEN(UNIT=230,FILE='tablo15050-30.csv')
OPEN(UNIT=229,FILE='tablo15050-35.csv')
OPEN(UNIT=228,FILE='tablo15050-37.csv')
OPEN(UNIT=227,FILE='tablo15050-40.csv')
OPEN(UNIT=226,FILE='tablo15050-41.csv')
OPEN(UNIT=225,FILE='tablo15050-43.csv')
OPEN(UNIT=224,FILE='tablo15050-44.csv')
OPEN(UNIT=223,FILE='tablo15050-45.csv')

```

```

SAY=1
DO J=1,3
DO I=1,11
READ(200+SAY,*)
DO K=1,100
READ(200+SAY,*) PAS,PAS,TABLO(J,I,K),PAS,HT(J,I,K),PAS,PAS,PAS,PAS
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,H2(J,I,K),H(J,I,K),O(J,I,K),O2(J,I,K),
*,OH(J,I,K),H2O(J,I,K),HO2(J,I,K),H2O2(J,I,K),C(J,I,K),CH(J,I,K),
*,CH2(J,I,K),CH2S(J,I,K),CH3(J,I,K),CH4(J,I,K),CO(J,I,K),CO2(J,I,K),
*,HCO(J,I,K),CH2O(J,I,K),CH2OH(J,I,K),CH3O(J,I,K),CH3OH(J,I,K),
*,C2H(J,I,K),C2H2(J,I,K),C2H3(J,I,K),C2H4(J,I,K),C2H5(J,I,K),
*,C2H6(J,I,K),HCCO(J,I,K),CH2CO(J,I,K),HCCOH(J,I,K),NNN(J,I,K),
*,NH(J,I,K),NH2(J,I,K),NH3(J,I,K),NNH(J,I,K),NO(J,I,K),NO2(J,I,K),
*,N2O(J,I,K),HNO(J,I,K),CN(J,I,K),HCN(J,I,K),H2CN(J,I,K),HCNN(J,I,K)
*,HCNO(J,I,K),HOCN(J,I,K),HNCO(J,I,K),NCO(J,I,K),N2(J,I,K),
*,AR(J,I,K),C3H7(J,I,K),C3H8(J,I,K),CH2CHO(J,I,K),CH3CHO(J,I,K),
*,PAS,CPCP(J,I,K),MW(J,I,K),YOGUNLUK(J,I,K),PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS
ENDDO
SAY=SAY+1
ENDDO
ENDDO

DO I=201,233
CLOSE(I)

```

ENDDO

```
OPEN(UNIT=111,FILE='tablo10000-0.csv')
OPEN(UNIT=110,FILE='tablo10000-10.csv')
OPEN(UNIT=109,FILE='tablo10000-15.csv')
OPEN(UNIT=108,FILE='tablo10000-20.csv')
OPEN(UNIT=107,FILE='tablo10000-24.csv')
OPEN(UNIT=106,FILE='tablo10000-26.csv')
OPEN(UNIT=105,FILE='tablo10000-30.csv')
OPEN(UNIT=104,FILE='tablo10000-33.csv')
OPEN(UNIT=103,FILE='tablo10000-36.csv')
OPEN(UNIT=102,FILE='tablo10000-38.csv')
OPEN(UNIT=101,FILE='tablo10000-39.csv')
```

```
OPEN(UNIT=122,FILE='tablo500-0.csv')
OPEN(UNIT=121,FILE='tablo500-10.csv')
OPEN(UNIT=120,FILE='tablo500-13.csv')
OPEN(UNIT=119,FILE='tablo500-17.csv')
OPEN(UNIT=118,FILE='tablo500-20.csv')
OPEN(UNIT=117,FILE='tablo500-23.csv')
OPEN(UNIT=116,FILE='tablo500-25.csv')
OPEN(UNIT=115,FILE='tablo500-27.csv')
OPEN(UNIT=114,FILE='tablo500-30.csv')
OPEN(UNIT=113,FILE='tablo500-33.csv')
OPEN(UNIT=112,FILE='tablo500-34.csv')
```

```
OPEN(UNIT=133,FILE='tablo255-0.csv')
OPEN(UNIT=132,FILE='tablo255-10.csv')
OPEN(UNIT=131,FILE='tablo255-15.csv')
OPEN(UNIT=130,FILE='tablo255-18.csv')
OPEN(UNIT=129,FILE='tablo255-20.csv')
OPEN(UNIT=128,FILE='tablo255-22.csv')
OPEN(UNIT=127,FILE='tablo255-25.csv')
OPEN(UNIT=126,FILE='tablo255-26.csv')
OPEN(UNIT=125,FILE='tablo255-28.csv')
OPEN(UNIT=124,FILE='tablo255-30.csv')
OPEN(UNIT=123,FILE='tablo255-31.csv')
```

```
SAY=1
DO J=4,6
DO I=1,11
READ(100+SAY,*)
DO K=1,100
READ(100+SAY,*) PAS,PAS,TABLO(J,I,K),PAS,HT(J,I,K),PAS,PAS,PAS,PAS
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
```

```

*PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,H2(J,I,K),H(J,I,K),O(J,I,K),O2(J,I,K),
*OH(J,I,K),H2O(J,I,K),HO2(J,I,K),H2O2(J,I,K),C(J,I,K),CH(J,I,K),
*CH2(J,I,K),CH2S(J,I,K),CH3(J,I,K),CH4(J,I,K),CO(J,I,K),CO2(J,I,K),
*HCO(J,I,K),CH2O(J,I,K),CH2OH(J,I,K),CH3O(J,I,K),CH3OH(J,I,K),
*C2H(J,I,K),C2H2(J,I,K),C2H3(J,I,K),C2H4(J,I,K),C2H5(J,I,K),
*C2H6(J,I,K),HCCO(J,I,K),CH2CO(J,I,K),HCCOH(J,I,K),NNN(J,I,K),
*NH(J,I,K),NH2(J,I,K),NH3(J,I,K),NNH(J,I,K),NO(J,I,K),NO2(J,I,K),
*N2O(J,I,K),HNO(J,I,K),CN(J,I,K),HCN(J,I,K),H2CN(J,I,K),HCNN(J,I,K)
*,HCNO(J,I,K),HOCN(J,I,K),HNCO(J,I,K),NCO(J,I,K),N2(J,I,K),
*AR(J,I,K),C3H7(J,I,K),C3H8(J,I,K),CH2CHO(J,I,K),CH3CHO(J,I,K),
*PAS,CPCP(J,I,K),MW(J,I,K),YOGUNLUK(J,I,K),PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS

```

```

ENDDO
SAY=SAY+1
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=101,133
CLOSE(I)
ENDDO

```

```

OPEN(UNIT=144,FILE='tablo0-0.csv')
OPEN(UNIT=143,FILE='tablo0-10.csv')
OPEN(UNIT=142,FILE='tablo0-13.csv')
OPEN(UNIT=141,FILE='tablo0-15.csv')
OPEN(UNIT=140,FILE='tablo0-18.csv')
OPEN(UNIT=139,FILE='tablo0-20.csv')
OPEN(UNIT=138,FILE='tablo0-22.csv')
OPEN(UNIT=137,FILE='tablo0-24.csv')
OPEN(UNIT=136,FILE='tablo0-26.csv')
OPEN(UNIT=135,FILE='tablo0-28.csv')
OPEN(UNIT=134,FILE='tablo0-29.csv')

```

```

OPEN(UNIT=155,FILE='tablo-2525-0.csv')
OPEN(UNIT=154,FILE='tablo-2525-10.csv')
OPEN(UNIT=153,FILE='tablo-2525-12.csv')
OPEN(UNIT=152,FILE='tablo-2525-15.csv')
OPEN(UNIT=151,FILE='tablo-2525-17.csv')
OPEN(UNIT=150,FILE='tablo-2525-20.csv')
OPEN(UNIT=149,FILE='tablo-2525-21.csv')
OPEN(UNIT=148,FILE='tablo-2525-23.csv')
OPEN(UNIT=147,FILE='tablo-2525-25.csv')
OPEN(UNIT=146,FILE='tablo-2525-26.csv')
OPEN(UNIT=145,FILE='tablo-2525-27.csv')

```

```

DO J=7,8
DO I=1,11
READ(100+SAY,*)
DO K=1,100
READ(100+SAY,*) PAS,PAS,TABLO(J,I,K),PAS,HT(J,I,K),PAS,PAS,PAS,PAS
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,H2(J,I,K),H(J,I,K),O(J,I,K),O2(J,I,K),
*,OH(J,I,K),H2O(J,I,K),HO2(J,I,K),H2O2(J,I,K),C(J,I,K),CH(J,I,K),
*,CH2(J,I,K),CH2S(J,I,K),CH3(J,I,K),CH4(J,I,K),CO(J,I,K),CO2(J,I,K),
*,HCO(J,I,K),CH2O(J,I,K),CH2OH(J,I,K),CH3O(J,I,K),CH3OH(J,I,K),
*,C2H(J,I,K),C2H2(J,I,K),C2H3(J,I,K),C2H4(J,I,K),C2H5(J,I,K),
*,C2H6(J,I,K),HCCO(J,I,K),CH2CO(J,I,K),HCCOH(J,I,K),NNN(J,I,K),
*,NH(J,I,K),NH2(J,I,K),NH3(J,I,K),NNH(J,I,K),NO(J,I,K),NO2(J,I,K),
*,N2O(J,I,K),HNO(J,I,K),CN(J,I,K),HCN(J,I,K),H2CN(J,I,K),HCNN(J,I,K)
*,HCNO(J,I,K),HOCN(J,I,K),HNCO(J,I,K),NCO(J,I,K),N2(J,I,K),
*,AR(J,I,K),C3H7(J,I,K),C3H8(J,I,K),CH2CHO(J,I,K),CH3CHO(J,I,K),
*,PAS,CPCP(J,I,K),MW(J,I,K),YOGUNLUK(J,I,K),PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS

```

```

ENDDO
SAY=SAY+1
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=134,155
CLOSE(I)
ENDDO

```

```

OPEN(UNIT=166,FILE='tablo-5050-0.csv')
OPEN(UNIT=165,FILE='tablo-5050-8.csv')
OPEN(UNIT=164,FILE='tablo-5050-10.csv')
OPEN(UNIT=163,FILE='tablo-5050-13.csv')
OPEN(UNIT=162,FILE='tablo-5050-15.csv')
OPEN(UNIT=161,FILE='tablo-5050-17.csv')
OPEN(UNIT=160,FILE='tablo-5050-18.csv')
OPEN(UNIT=159,FILE='tablo-5050-20.csv')
OPEN(UNIT=158,FILE='tablo-5050-23.csv')
OPEN(UNIT=157,FILE='tablo-5050-24.csv')
OPEN(UNIT=156,FILE='tablo-5050-25.csv')

```

```

OPEN(UNIT=177,FILE='tablo-8585-0.csv')
OPEN(UNIT=176,FILE='tablo-8585-6.csv')
OPEN(UNIT=175,FILE='tablo-8585-8.csv')
OPEN(UNIT=174,FILE='tablo-8585-10.csv')
OPEN(UNIT=173,FILE='tablo-8585-11.csv')

```

```

OPEN(UNIT=172,FILE='tablo-8585-13.csv')
OPEN(UNIT=171,FILE='tablo-8585-15.csv')
OPEN(UNIT=170,FILE='tablo-8585-18.csv')
OPEN(UNIT=169,FILE='tablo-8585-20.csv')
OPEN(UNIT=168,FILE='tablo-8585-21.csv')
OPEN(UNIT=167,FILE='tablo-8585-22.csv')

```

```

OPEN(UNIT=178,FILE='tablo.dat')
OPEN(UNIT=179,FILE='tablo.CSV')

```

! DEFECT DEĞERLERİ !!!!

```

DEFECT(1)=350.0 !
DEFECT(2)=250.0 !
DEFECT(3)=150.0 !
DEFECT(4)=100.0 !
DEFECT(5)=50.0 !
DEFECT(6)=25.0 !
DEFECT(7)=0.0 !
DEFECT(8)=-25.0 !
DEFECT(9)=-50.0 !
DEFECT(10)=-85.0 !
! !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

!! SCALAR DISS. OKUMA !!!!!!!!!!!!!!!

```

DO J=1,10
READ(178,*) SCDR(J,1),SCDR(J,2),SCDR(J,3),SCDR(J,4),SCDR(J,5),
*SCDR(J,6),SCDR(J,7),SCDR(J,8),SCDR(J,9),SCDR(J,10),SCDR(J,11)
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

!! Z OKUMA!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

DO K=1,100
READ(179,*) ZZ(1,K),ZZ(2,K),ZZ(3,K),ZZ(4,K),ZZ(5,K),ZZ(6,K)
*,ZZ(7,K),ZZ(8,K),ZZ(9,K),ZZ(10,K)
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

DO J=9,10

```

```

DO I=1,11

```

```

READ(100+SAY,*)
DO K=1,100

```

```

READ(100+SAY,*) PAS,PAS,TABLO(J,I,K),PAS,HT(J,I,K),PAS,PAS,PAS,PAS
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,H2(J,I,K),H(J,I,K),O(J,I,K),O2(J,I,K),
*,OH(J,I,K),H2O(J,I,K),HO2(J,I,K),H2O2(J,I,K),C(J,I,K),CH(J,I,K),
*,CH2(J,I,K),CH2S(J,I,K),CH3(J,I,K),CH4(J,I,K),CO(J,I,K),CO2(J,I,K),
*,HCO(J,I,K),CH2O(J,I,K),CH2OH(J,I,K),CH3O(J,I,K),CH3OH(J,I,K),
*,C2H(J,I,K),C2H2(J,I,K),C2H3(J,I,K),C2H4(J,I,K),C2H5(J,I,K),
*,C2H6(J,I,K),HCCO(J,I,K),CH2CO(J,I,K),HCCOH(J,I,K),NNN(J,I,K),
*,NH(J,I,K),NH2(J,I,K),NH3(J,I,K),NNH(J,I,K),NO(J,I,K),NO2(J,I,K),
*,N2O(J,I,K),HNO(J,I,K),CN(J,I,K),HCN(J,I,K),H2CN(J,I,K),HCNN(J,I,K)
*,HCNO(J,I,K),HOCN(J,I,K),HNCO(J,I,K),NCO(J,I,K),N2(J,I,K),
*,AR(J,I,K),C3H7(J,I,K),C3H8(J,I,K),CH2CHO(J,I,K),CH3CHO(J,I,K),
*,PAS,CPCP(J,I,K),MW(J,I,K),YOGUNLUK(J,I,K),PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,
*,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS,PAS

```

```

ENDDO
SAY=SAY+1
ENDDO
ENDDO

```

```

SAY=0

```

```

DO I=156,179
CLOSE(I)
ENDDO

```

```

OPEN(UNIT=41,FILE='INITIAL.dat')
OPEN(UNIT=42,FILE='INITIAL.dat')
OPEN(UNIT=43,FILE='INITIAL.dat')
OPEN(UNIT=44,FILE='INITIAL.dat')
OPEN(UNIT=45,FILE='INITIAL.dat')
OPEN(UNIT=46,FILE='INITIAL.dat')

```

```

LL=M/26
HHH=N/6

```

```

L1=7*LL
L2=L1+1
L3=12*LL
L4=L3+1
L5=14*LL
L6=L5+1
L7=19*LL

```

L8=L7+1

HH1=HHH

HH2=HH1+1

HH3=3*HHH

HH4=HH3+1

Format = "(I9, 4F15.7)"

!!!!!!!!!!!!!!TÜM GİRDİLER!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!! GAS VE KATI OZELLEKLERİ!!!

ROGAS= 1.1 ! Kg/m3 !

MU = 1.5E-05 ! PA.s !

KG = 0.075 ! W/m.K !

ROs= 2750.0 ! Kg/m3 !

Ho = 305000.0 ! J/KG !

Hf = 900000.0 ! J/KG !

Uo = 0.08 ! m/s !

Uf = 0.0006 ! m/s !

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

BOLTZ=5.67E-08

EMMIS=0.8

TINF=300.0

!! GÖZENEKLİ ORTAM ÖZELLİKLERİ!!!!

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

Dp1= 0.00050 !m ! !

Dp2= 0.00075 !m ! !

Dp3= 0.00085 !m ! !

POR1= 0.85 ! !

POR2= 0.85 ! !

POR3= 0.85 ! !

CCC1= 0.638 ! !

CCC2= 0.146 ! !

CCC3= 0.146 ! !

mmm1= 0.42 ! !

mmm2= 0.96 ! !

mmm3= 0.96 ! !

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !

!!RAHATLAMALAR

MFRAHAT=1.0


```
TSRAHAT=1.0
HRAHAT=0.1
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
!! ORTAMA ATAMALAR!!!!!!
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,HH1 !
DO I=1,M !
Dp(I,J)=Dp1
POR(I,J)=POR1 !
ENDDO !
ENDDO !
```

```
DO J=HH2,HH3
DO I=1,M
Dp(I,J)=Dp2
POR(I,J)=POR2
ENDDO
ENDDO
```

```
DO J=HH4,N
DO I=1,M
Dp(I,J)=Dp3
POR(I,J)=POR3
ENDDO
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,HH1
DO I=1,M
CCC(I,J)=CCC1
ENDDO
ENDDO
```

```
DO J=HH2,HH3
DO I=1,M
CCC(I,J)=CCC2
ENDDO
ENDDO
```

```
DO J=HH4,N
DO I=1,M
CCC(I,J)=CCC3
ENDDO
ENDDO
```

!!!!!!!!!!!!!!

!!!!!!!!!!!!!!

```
DO J=1,HH1
DO I=1,M
mmm(I,J)=mmm1
ENDDO
ENDDO
```

```
DO J=HH2,HH3
DO I=1,M
mmm(I,J)=mmm2
ENDDO
ENDDO
```

```
DO J=HH4,N
DO I=1,M
mmm(I,J)=mmm3
ENDDO
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!
```

```
DO J=1,N
DO I=1,M
KKK(I,J)=((Dp(I,J)**2)*(POR(I,J)**3))/(180*(1-POR(I,J)**2))
MUV(I,J)=MU
KGA(I,J)=KG
ENDDO
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

!TAHMINİ HIZ VE BASINC DEĞERLERİ

```
DO I=1,M
DO J=1,N
CPS(I,J)=700.0
CPG(I,J)=1000.0
KS(I,J)=100.0
UXSTAR(I,J)=0.0
UYSTAR(I,J)=0.00
TSOL(I,J)=300.0
P(I,J)=0.0
PP(I,J)=0.0
ROg(I,J)=ROGAS
ROgO(I,J)=ROg(I,J)
ENDDO
```

ENDDO

DO I=1,M
DO J=1,HH1
TSOL(I,J)=300.0
ENDDO
ENDDO

DO J=1,N
DO I=1,M
READ(41,'(3F15.6)') PAS,PAS,P(I,J)
READ(42,'(3F15.6)') PAS,PAS,MIXFRAC(I,J)
READ(43,'(3F15.6)') PAS,PAS,TG(I,J)
READ(44,'(3F15.6)') PAS,PAS,ENTH(I,J)
READ(45,'(3F15.6)') PAS,PAS,TSOL(I,J)
READ(46,'(4F15.6)') PAS,PAS,UXSTAR(I,J),UYSTAR(I,J)
ENDDO
ENDDO

DO I=1,M
UYSTAR(I,1)=Uo
ENDDO

DO I=1,L1
UYSTAR(I,1)=0.0
TSOL(I,1)=300.0
ENDDO

DO I=L8,M
UYSTAR(I,1)=0.0
TSOL(I,1)=300.0
ENDDO

DO I=L4,L5
UYSTAR(I,1)=Uf
TSOL(I,1)=300.0
ENDDO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!MFSINIRLAR!!!!!!!!!!!!!!
DO I=L2,L3
MIXFRAC(I,1)=0.0
ENDDO
DO I=L4,L5
MIXFRAC(I,1)=1.0
ENDDO

```

DO I=L6,L7
MIXFRAC(I,1)=0.0
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!ENTH SINIRLAR!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,N !!
DO I=1,M !!
ENTH(I,J)=0.0 !!
ENDDO !!
ENDDO !!
DO I=L2,L3 !!
ENTH(I,1)=Ho !!
ENDDO !!
DO I=L4,L5 !!
ENTH(I,1)=Hf !!
ENDDO !!
DO I=L6,L7 !!
ENTH(I,1)=Ho !!
ENDDO !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!HÜCRE MERKEZLİ SONLU HACİMLER İÇİN
!IZGARANIN YAPILANDIRILMASI

```

```

DO J=2,N-1
DYK(J)=Y(J+1)-Y(J)
DYG(J)=Y(J)-Y(J-1)
DY(J)=YB(J)-YB(J-1)
DO I=2,M-1
DXD(I)=X(I+1)-X(I)
DXB(I)=X(I)-X(I-1)
DX(I)=XB(I)-XB(I-1)

```

```

DXY(I,J)=DX(I)*DY(J)

```

```

ENDDO
ENDDO

```

```

! DO WHILE (HATA.GT.MHATA)
! DO WHILE (FARK.GT.1.0)
DO WHILE (SAY.LT.250000)

```

```
! IF(SAY.EQ.100000) THEN
! DT=1.0000E-04
```

```
! DO I=1,M
! DO J=1,N
! TSOL(I,J)=1300
! ENDDO
! ENDDO
```

```
! DO I=1,M
! DO J=1,HH1
! TSOL(I,J)=300
! ENDDO
! ENDDO
```

```
! ENDIF
```

```
SAY=SAY+1
```

```
DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
UYSTARESK(I,J)=UYSTAR(I,J)
UXSTARESK(I,J)=UXSTAR(I,J)
UXbESK(I,J)=UXb(I,J)
UXdESK(I,J)=UXd(I,J)
UYkESK(I,J)=UYk(I,J)
UYgESK(I,J)=UYg(I,J)
UXbSTARESK(I,J)=UXbSTAR(I,J)
UXdSTARESK(I,J)=UXDSTAR(I,J)
UYkSTARESK(I,J)=UYkSTAR(I,J)
UYgSTARESK(I,J)=UYgSTAR(I,J)
ENDDO
ENDDO
```

```
!! ARA YÜZEYLERDEKİ YOĞUNLUK VE ÖZISILARIN BULUNMASI
```

```
DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
ROD(I,J)=PFD(I,J)*ROg(I+1,J)+(1-PFD(I,J))*ROg(I,J)
ROB(I,J)=PFB(I,J)*ROg(I,J)+(1-PFB(I,J))*ROg(I-1,J)
ROK(I,J)=PFK(I,J)*ROg(I,J+1)+(1-PFK(I,J))*ROg(I,J)
ROGG(I,J)=PFG(I,J)*ROg(I,J)+(1-PFG(I,J))*ROg(I,J-1)
ENDDO
ENDDO
```

! KATSAYILARIN HESAPLANMASI

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

DB(I,J)=MUV(I,J)*DY(J)/DXB(I)

DD(I,J)=MUV(I,J)*DY(J)/DXD(I)

DK(I,J)=MUV(I,J)*DX(I)/DYK(J)

DG(I,J)=MUV(I,J)*DX(I)/DYG(J)

FB(I,J)=UXb(I,J)*DY(J)*ROB(I,J)/POR(I,J)

FD(I,J)=UXd(I,J)*DY(J)*ROD(I,J)/POR(I,J)

FK(I,J)=UYk(I,J)*DX(I)*ROK(I,J)/POR(I,J)

FG(I,J)=UYg(I,J)*DX(I)*ROGG(I,J)/POR(I,J)

PWD(I,J)=DMAX1(-FD(I,J),ZERO)

PWB(I,J)=DMAX1(FB(I,J),ZERO)

PWK(I,J)=DMAX1(-FK(I,J),ZERO)

PWG(I,J)=DMAX1(FG(I,J),ZERO)

PDC=FD(I,J)/(DD(I,J))

PBC=FB(I,J)/(DB(I,J))

PKC=FK(I,J)/(DK(I,J))

PGC=FG(I,J)/(DG(I,J))

APD=A(PDC)

APB=A(PBC)

APK=A(PKC)

APG=A(PGC)

AD(I,J)=DD(I,J)*APD+PWD(I,J)

AB(I,J)=DB(I,J)*APB+PWB(I,J)

AK(I,J)=DK(I,J)*APK+PWK(I,J)

AG(I,J)=DG(I,J)*APG+PWG(I,J)

SC(I,J)=0.0

SN(I,J)=0.0

ENDDO

ENDDO

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

AN0(I,J)=ROgO(I,J)*DX(I)*DY(J)/(DT)

ENDDO

ENDDO

!! HESAPLANACAK KATSAYILAR!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

Dz(I,J)=KGA(I,J)/(ROg(I,J)*CPG(I,J))

ENDDO

ENDDO

!!

DO I=1,M

DO J=1,N

DMOM=(POR(I,J)*MUV(I,J)/KKK(I,J))+SQRT((UXSTAR(I,J)**2)+
*(UYSTAR(I,J)**2))*(ROg(I,J)*1.75/SQRT(150.0*POR(I,J)**3))
*/SQRT(KKK(I,J))

ENDDO

ENDDO

! ARAYÜZEY BASINÇLARINI BULMAK İÇİN fd,fb,fk ve fg

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

PFD(I,J)=DX(I)/(2*DXD(I))

PFB(I,J)=DX(I-1)/(2*DXB(I))

PFK(I,J)=DY(J)/(2*DYK(J))

PFG(I,J)=DY(J-1)/(2*DYG(J))

ENDDO

ENDDO

! ARAYÜZEY BASINÇLARI

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

KPD(I,J)=PFD(I,J)*P(I+1,J)+(1-PFD(I,J))*P(I,J)

KPB(I,J)=PFB(I,J)*P(I,J)+(1-PFB(I,J))*P(I-1,J)

KPK(I,J)=PFK(I,J)*P(I,J+1)+(1-PFK(I,J))*P(I,J)

KPG(I,J)=PFG(I,J)*P(I,J)+(1-PFG(I,J))*P(I,J-1)

ENDDO

ENDDO

! UX HIZININ COZUMU (DENKLEM 8.86)

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

UXSTARO(I,J)=UXSTAR(I,J)

```

ENDDO
ENDDO
DO J=2,N-1
! soldaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(2,J)=UXSTAR(1,J)*DY(J)/DXB(2)
SN(2,J)=-DY(J)/DXB(2)
AB(2,J)=0.0
! sağdaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(M-1,J)=UXSTAR(M,J)*DY(J)/DXD(M-1)
SN(M-1,J)=-DY(J)/DXD(M-1)
AD(M-1,J)=0.0
DO I=2,M-1
C.....Hesaplamanın başlaması
!Tüm düğüm noktaları için üç bant genişlikli matrisin katsayıları
SUBD(I)=-AB(I,J)
DIAG(I)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)
*+AN0(I,J)+DMOM*DX(I)*DY(J)
SUPERD(I)=-AD(I,J)
D(I)=AG(I,J)*UXSTAR(I,J-1)+AK(I,J)*UXSTAR(I,J+1)+SC(I,J)
*+AN0(I,J)*UXSTAR(I,J)+((KPB(I,J)-KPD(I,J))*DY(J))*POR(I,J)
ENDDO

```

```

CALL TDMA(M,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

```

```

DO I=2,M-1
UXSTAR(I,J)=UXRAHAT*S(I)+(1-UXRAHAT)*UXSTAR(I,J)
ENDDO

```

```

ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
! Alt yüzeydeki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,2)=UXSTAR(I,1)*DX(I)/DYG(2)
SN(I,2)=-DX(I)/DYG(2)
AG(I,2)=0.0
! Üst yüzeydeki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,N-1)=UXSTAR(I,N)*DX(I)/DYK(N-1)
SN(I,N-1)=-DX(I)/DYK(N-1)
AK(I,N-1)=0.0
DO J=2,N-1
SUBD(J)=-AG(I,J)
DIAG(J)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)
*+AN0(I,J)+DMOM*DX(I)*DY(J)
SUPERD(J)=-AK(I,J)
D(J)=AB(I,J)*UXSTAR(I-1,J)+AD(I,J)*UXSTAR(I+1,J)+SC(I,J)
*+AN0(I,J)*UXSTAR(I,J)+((KPB(I,J)-KPD(I,J))*DY(J))*POR(I,J)

```


ENDDO

CALL TDMA(N,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

DO J=2,N-1

UXSTAR(I,J)=UXRAHAT*S(J)+(1-UXRAHAT)*UXSTAR(I,J)

ENDDO

ENDDO

! BASINC DÜZELTMESİ İÇİN GEREKLİ $(1/AN)^b$ VE $(1/AN)^d$

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

AN(I,J)=AB(I,J)+AD(I,J)+AK(I,J)+AG(I,J)+AN0(I,J)-SN(I,J)

ENDDO

ENDDO

DO I=3,M-1

DO J=2,N-1

BAN(I,J)=PFB(I,J)*(1/AN(I,J))+(1-PFB(I,J))*(1/AN(I-1,J))

ENDDO

ENDDO

DO I=2,M-2

DO J=2,N-1

DAN(I,J)=PFD(I,J)*(1/AN(I+1,J))+(1-PFD(I,J))*(1/AN(I,J))

ENDDO

ENDDO

! UY HIZININ COZUMU (DENKLEM 8.87)

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

AD(I,J)=DD(I,J)*APD+PWD(I,J)

AB(I,J)=DB(I,J)*APB+PWB(I,J)

AK(I,J)=DK(I,J)*APK+PWK(I,J)

AG(I,J)=DG(I,J)*APG+PWG(I,J)

SC(I,J)=0.0

SN(I,J)=0.0

UYSTARO(I,J)=UYSTAR(I,J)

ENDDO

ENDDO

DO J=2,N-1

! soldaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi

SC(2,J)=UYSTAR(1,J)*DY(J)/DXB(2)

SN(2,J)=-DY(J)/DXB(2)

AB(2,J)=0.0

! sağdaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi

SC(M-1,J)=UYSTAR(M,J)*DY(J)/DXD(M-1)

SN(M-1,J)=-DY(J)/DXD(M-1)

AD(M-1,J)=0.0

DO I=2,M-1

C.....Hesaplamanın başlaması

!Tüm düğüm noktaları için üç bant genişlikli matrisin katsayıları

SUBD(I)=-AB(I,J)

DIAG(I)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)

*+AN0(I,J)+DMOM*DX(I)*DY(J)

SUPERD(I)=-AD(I,J)

D(I)=AG(I,J)*UYSTAR(I,J-1)+AK(I,J)*UYSTAR(I,J+1)+SC(I,J)

*+AN0(I,J)*UYSTAR(I,J)+((KPG(I,J)-KPK(I,J))*DX(I))*POR(I,J)

ENDDO

CALL TDMA(M,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

DO I=2,M-1

UYSTAR(I,J)=UYRAHAT*S(I)+(1-UYRAHAT)*UYSTAR(I,J)

ENDDO

ENDDO

DO I=2,M-1

! Alt yüzeydeki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi

SC(I,2)=UYSTAR(I,1)*DX(I)/DYG(2)

SN(I,2)=-DX(I)/DYG(2)

AG(I,2)=0.0

! Üst yüzeydeki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi

SC(I,N-1)=0.0

SN(I,N-1)=0.0

AK(I,N-1)=0.0

DO J=2,N-1

SUBD(J)=-AG(I,J)

DIAG(J)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)

*+AN0(I,J)+DMOM*DX(I)*DY(J)

SUPERD(J)=-AK(I,J)

D(J)=AB(I,J)*UYSTAR(I-1,J)+AD(I,J)*UYSTAR(I+1,J)+SC(I,J)

*+AN0(I,J)*UYSTAR(I,J)+((KPG(I,J)-KPK(I,J))*DX(I))*POR(I,J)

ENDDO

CALL TDMA(N,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

```

DO J=2,N-1
UYSTAR(I,J)=UYRAHAT*S(J)+(1-UYRAHAT)*UYSTAR(I,J)
ENDDO

```

```

ENDDO

```

```

! ÜST SİMETRİKLİK KOŞULU İÇİN
DO I=1,M
UYSTAR(I,N)=UYSTAR(I,N-1)
ENDDO

```

```

! BASINC DÜZELTMESİ İÇİN GEREKLİ (1/AN)k VE (1/AN)g

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
AN(I,J)=AB(I,J)+AD(I,J)+AK(I,J)+AG(I,J)+AN0(I,J)-SN(I,J)
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-2
KAN(I,J)=PFK(I,J)*(1/AN(I,J+1))+(1-PFK(I,J))*(1/AN(I,J))
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=3,N-1
GAN(I,J)=PFG(I,J)*(1/AN(I,J))+(1-PFG(I,J))*(1/AN(I,J-1))
ENDDO
ENDDO

```

```

! ARAYÜZEY HIZLARINI HESAPLAYALIM

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
UXbSTAR(I,J)=(UXSTAR(I-1,J)+UXSTAR(I,J))/2
UXdSTAR(I,J)=(UXSTAR(I+1,J)+UXSTAR(I,J))/2
UYkSTAR(I,J)=(UYSTAR(I,J)+UYSTAR(I,J+1))/2
UYgSTAR(I,J)=(UYSTAR(I,J)+UYSTAR(I,J-1))/2
ENDDO
ENDDO

```

```

! BASINC ICIN SOR UYGULAMASI ( 8.101)

```

```

DO J=2,(N-1)
DO I=2,(M-1)
PDB(I,J)=DY(J)*BAN(I,J)
PDD(I,J)=DY(J)*DAN(I,J)
PDK(I,J)=DX(I)*KAN(I,J)
PDG(I,J)=DX(I)*GAN(I,J)

PAB(I,J)=PDB(I,J)*DY(J)
PAD(I,J)=PDD(I,J)*DY(J)
PAK(I,J)=PDK(I,J)*DX(I)
PAG(I,J)=PDG(I,J)*DX(I)

PAN(I,J)=PAB(I,J)+PAD(I,J)+PAK(I,J)+PAG(I,J)

PBP(I,J)=(UXBSTAR(I,J)-UXDSTAR(I,J))*DY(J)+(UYGSTAR(I,J)-
*UYKSTAR(I,J))*DX(I)

!((ROgO(I,J)-ROg(I,J))*DX(I)*DY(J)/DT)+

END DO

END DO

! SINIRLAR İÇİN DÜZELTMELER

DO J=1,N
PAB(2,J)=0.0
PAD(M-1,J)=0.0
ENDDO

DO I=1,M
PAG(I,2)=0.0
PAK(I,N-1)=0.0
ENDDO

DO I=1,M
DO J=1,N
PP(I,J)=0.0
PAN(I,J)=PAB(I,J)+PAD(I,J)+PAK(I,J)+PAG(I,J)
ENDDO
ENDDO

DO K=1,2

```

DO J=2,N-1

DO I=2,M-1

PPO(I,J)=PP(I,J)

PP(I,J)=(PAD(I,J)*PP(I+1,J)+PAB(I,J)*PP(I-1,J)+PAK(I,J)*
*PP(I,J+1)+PAG(I,J)*PP(I,J-1)+PBP(I,J))/PAN(I,J)

! Rahatlama Uygulanması

PP(I,J)=PPRAHAT*PP(I,J)+(1-PPRAHAT)*PPO(I,J)

ENDDO

ENDDO

! SİMETRİKLİK İÇİN

DO I=1,M

PP(I,1)=PP(I,2)

! PP(I,N)=PP(I,N-1)

ENDDO

DO J=1,N

PP(1,J)=PP(2,J)

PP(M,J)=PP(M-1,J)

ENDDO

ENDDO

DO I=1,M

DO J=1,N

P(I,J)=P(I,J)+0.7*PP(I,J)

ENDDO

ENDDO

! SOR UYGULAMASI SONU

! DÜZELTİLMİŞ ARAYÜZEY HIZLARI DENKLEM 8.100

DO I=2,M-1

DO J=2,N-1

UXd(I,J)=UXDSTAR(I,J)+PDD(I,J)*(PP(I,J)-PP(I+1,J))

UXb(I,J)=UXBSTAR(I,J)+PDB(I,J)*(PP(I-1,J)-PP(I,J))

```

UYk(I,J)=UYKSTAR(I,J)+PDK(I,J)*(PP(I,J)-PP(I,J+1))
UYg(I,J)=UYGSTAR(I,J)+PDG(I,J)*(PP(I,J-1)-PP(I,J))
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
UXSTAR(I,J)=(UXd(I,J)+UXb(I,J))/2.0
UYSTAR(I,J)=(UYk(I,J)+UYg(I,J))/2.0
ENDDO
ENDDO

```

```

! ÜST SİMETRİKLİK KOŞULU İÇİN
DO I=1,M
UYSTAR(I,N)=UYSTAR(I,N-1)
ENDDO

```

```

HATA=0.0
DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
HATA=HATA+DABS((UYSTAR(I,J)-UYSTARESK(I,J)))
ENDDO
ENDDO

```

```

!!FRACTION DENKLEM COZUMU !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! Mixture Fraction Denklemi
1 DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
AN0(I,J)=ROgO(I,J)*DX(I)*DY(J)/(DT)
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
DD(I,J)= ROD(I,J)*Dz(I,J)*DY(J)/DXD(I)
DB(I,J)= ROB(I,J)*Dz(I,J)*DY(J)/DXB(I)
DK(I,J)= ROK(I,J)*Dz(I,J)*DX(I)/DYK(J)
DG(I,J)= ROGG(I,J)*Dz(I,J)*DX(I)/DYG(J)

```

```

FD(I,J)=UXd(I,J)*DY(J)
FB(I,J)=UXb(I,J)*DY(J)
FK(I,J)=UYk(I,J)*DX(I)
FG(I,J)=UYg(I,J)*DX(I)

```

```

PDC=ROD(I,J)*FD(I,J)/DD(I,J)
PBC=ROB(I,J)*FB(I,J)/DB(I,J)

```

```

PKC=ROK(I,J)*FK(I,J)/DK(I,J)
PGC=ROGG(I,J)*FG(I,J)/DG(I,J)

```

```

AD(I,J)=DD(I,J)*AMAX1(0.0,(1.0-0.1*abs(PDC))**(5))
*+AMAX1(-FD(I,J),0.0)
AB(I,J)=DB(I,J)*AMAX1(0.0,(1.0-0.1*abs(PBC))**(5))
*+AMAX1(FB(I,J),0.0)
AK(I,J)=DK(I,J)*AMAX1(0.0,(1.0-0.1*abs(PKC))**(5))
*+AMAX1(-FK(I,J),0.0)
AG(I,J)=DG(I,J)*AMAX1(0.0,(1.0-0.1*abs(PGC))**(5))
*+AMAX1(FG(I,J),0.0)

```

```

SC(I,J)=0
SN(I,J)=0
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
MIXFRACO(I,J)=MIXFRAC(I,J)
END DO
END DO

```

```

DO J=2,N-1
! soldaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(2,J)=0.0
SN(2,J)=0.0
AB(2,J)=0.0
! sağdaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(M-1,J)=0.0
SN(M-1,J)=0.0
AD(M-1,J)=0.0
DO I=2,M-1
C.....Hesaplamanın başlaması
!Tüm düğüm noktaları için üç bant genişlikli matrisin katsayıları
SUBD(I)=-AB(I,J)
DIAG(I)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)
*+AN0(I,J)
SUPERD(I)=-AD(I,J)
D(I)=AG(I,J)*MIXFRAC(I,J-1)+AK(I,J)*MIXFRAC(I,J+1)+SC(I,J)
*+AN0(I,J)*MIXFRAC(I,J)
ENDDO

```

```

CALL TDMA(M,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

```

```

DO I=2,M-1
MIXFRAC(I,J)=MFRAHAT*S(I)+(1-MFRAHAT)*MIXFRAC(I,J)
ENDDO
ENDDO

```

!SİMETRİ KOŞULUNDAN SINIR DÜZELTMESİ

```

DO J=1,N
MIXFRAC(1,J)=MIXFRAC(2,J)
MIXFRAC(M,J)=MIXFRAC(M-1,J)
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
! ÜST yüzeydeki DUVAR sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,N-1)=0.0
SN(I,N-1)=0.0
AK(I,N-1)=0.0
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
! Alt yüzeydeki DUVAR sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,2)=0.0
SN(I,2)=0.0
AG(I,2)=0.0
ENDDO

```

```

DO I=L2,L7
! Alt yüzeydeki GİRİŞ sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,2)=MIXFRAC(I,1)*DX(I)/DYG(2)
SN(I,2)=-DX(I)/DYG(2)
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
SUBD(J)=-AG(I,J)
DIAG(J)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)+AN0(I,J)
SUPERD(J)=-AK(I,J)
D(J)=AB(I,J)*MIXFRAC(I-1,J)+AD(I,J)*MIXFRAC(I+1,J)+SC(I,J)
*+AN0(I,J)*MIXFRAC(I,J)
ENDDO

```

CALL TDMA(N,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

```

DO J=2,N-1
MIXFRAC(I,J)=MFRAHAT*S(J)+(1-MFRAHAT)*MIXFRAC(I,J)
ENDDO

```



```

ENDDO
!DUVARLARDA SİMETRİ KOŞULU DÜZELTMESİ

```

```

DO I=1,M
MIXFRAC(I,N)=MIXFRAC(I,N-1)
ENDDO

```

```

DO I=1,L1
MIXFRAC(I,1)=MIXFRAC(I,2)
ENDDO

```

```

DO I=L8,M
MIXFRAC(I,1)=MIXFRAC(I,2)
ENDDO

```

```

MFHATA=0.0
DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
MFHATA=MFHATA+DABS((MIXFRAC(I,J)-MIXFRACO(I,J)))
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
!! SCALAR DISSIPATION RATE!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
NABLAZ(I,J)=(((MIXFRAC(I+1,J)-MIXFRAC(I-1,J))/(DXD(I)+DXB(I)))**2)
*+(((MIXFRAC(I,J+1)-MIXFRAC(I,J-1))/(DYG(J)+DYK(J)))**2)
SCDRATE(I,J)=2*Dz(I,J)*((NABLAZ(I,J))) !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
ENDDO
ENDDO

```

```

DO J=1,HH1
DO I=1,M
SCDRATE(I,J)=100.0

```

```

IF (DFC(I,J).LT.0.0) THEN
DFC(I,J)=0.0
ENDIF

```

```

ENDDO
ENDDO

```

```

!!!!!! TABLO OKUMA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=2,M-1 !

```

```

DO J=2,N-1 !
ROgO(I,J)=ROg(I,J)
CALL OKUMA(TABLO,DFC(I,J),MIXFRAC(I,J),SCDRATE(I,J),DEFECT,SCDR,
!
*ZZ,TTG,YOGUNLUK,RO,CPCP,CPGAS,O2,N2,H2O,CO2,CH4,K1,K2,K3,K4,K5)
!
CALL TRANSPORT(TTG,K1,K2,K3,K4,K5,MUU,KGASS) !
TG(I,J)=TTG !
ROg(I,J)=RO !
CPG(I,J)=CPGAS !
O2O2(I,J)=K1 !
N2N2(I,J)=K2 !
H2OH2O(I,J)=K3 !
CO2CO2(I,J)=K4 !
CH4CH4(I,J)=K5 !
MUV(I,J)=MUU !
KGA(I,J)=KGASS !
ENDDO !
ENDDO !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

DO J=1,N
ROg(1,J)=ROg(2,J)
TG(1,J)=TG(2,J)
ROg(M,J)=ROg(M-1,J)
TG(M,J)=TG(M-1,J)
ENDDO

```

```

DO I=1,M
ROg(I,1)=ROg(I,2)
TG(I,1)=TG(I,2)
ROg(I,N)=ROg(I,N-1)
TG(I,N)=TG(I,N-1)
ENDDO

```

```

!!! SICAKLIK DÜZELTME !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=1,M !
TG(I,17)=TG(I,16)+(TG(I,21)-TG(I,16))/45.0 !
TG(I,18)=TG(I,16)+(TG(I,21)-TG(I,16))/15.0 !
TG(I,19)=TG(I,16)+(TG(I,21)-TG(I,16))/5.0 !
TG(I,20)=TG(I,21)-(TG(I,21)-TG(I,16))/2.5 !
ENDDO !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

!! Mixture Fraction Sonu

```

!!! VOLUMETRIC HEAT TRANSFER COEF HESABI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=2,M !
DO J=2,N !
!!! REYNOLDS NUMBER!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
REYNOLDS(I,J)=ROg(I,J)*SQRT((UXSTAR(I,J)**2)+(UYSTAR(I,J)**2))* !
*DP(I,J)/MUV(I,J) !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!! VOLUMETRIC NUSSELT SAYISI!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
NUv(I,J)=(1+4*(1-POR(I,J))/POR(I,J)+(1/2)*((1-POR(I,J))**(1/2)) !
**REYNOLDS(I,J)*(0.5)**(1/3) !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!! Hv !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !
Hv(I,J)=(NUv(I,J)*KGA(I,J)/(DP(I,J)**2)) ! !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !
ENDDO !
ENDDO !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!KATIGAS DENKLEM COZUMU !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
AN0(I,J)=(1-POR(I,J))*ROs*CPS(I,J)*DX(I)*DY(J)/(DT)
ENDDO
ENDDO

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
DD(I,J)= Ks(I,J)*(1-POR(I,J))*DY(J)/DXD(I)
DB(I,J)= Ks(I,J)*(1-POR(I,J))*DY(J)/DXB(I)
DK(I,J)= (Ks(I,J)*(1-POR(I,J)))*DX(I)/DYK(J)
! *+(16.0*BOLTZ*((TSOL(I,J))**3)*Dp(I,J)/(9*(1-POR(I,J))))*
! *DX(I)/DYK(J)
DG(I,J)= (Ks(I,J)*(1-POR(I,J)))*DX(I)/DYG(J)
! *+(16.0*BOLTZ*((TSOL(I,J))**3)*Dp(I,J)/(9*(1-POR(I,J))))*
! *DX(I)/DYG(J)

FD(I,J)=0.0
FB(I,J)=0.0
FK(I,J)=0.0
FG(I,J)=0.0

PWD(I,J)=DMAX1(-FD(I,J),ZERO)
PWB(I,J)=DMAX1(FB(I,J),ZERO)
PWK(I,J)=DMAX1(-FK(I,J),ZERO)
PWG(I,J)=DMAX1(FG(I,J),ZERO)

PDC=FD(I,J)/(DD(I,J))
PBC=FB(I,J)/(DB(I,J))

```

PKC=FK(I,J)/(DK(I,J))
PGC=FG(I,J)/(DG(I,J))

APD=A(PDC)
APB=A(PBC)
APK=A(PKC)
APG=A(PGC)

AD(I,J)=DD(I,J)*APD+PWD(I,J)
AB(I,J)=DB(I,J)*APB+PWB(I,J)
AK(I,J)=DK(I,J)*APK+PWK(I,J)
AG(I,J)=DG(I,J)*APG+PWG(I,J)

SC(I,J)=0
SN(I,J)=0
ENDDO
ENDDO

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
TSOLO(I,J)=TSOL(I,J)
END DO
END DO

DO J=2,N-1
! soldaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(2,J)=0.0
SN(2,J)=0.0
AB(2,J)=0.0
! sağdaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(M-1,J)=0.0
SN(M-1,J)=0.0
AD(M-1,J)=0.0
DO I=2,M-1
C.....Hesaplamanın başlaması
!Tüm düğüm noktaları için üç bant genişlikli matrisin katsayıları
SUBD(I)=-AB(I,J)
DIAG(I)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)
*+AN0(I,J)+Hv(I,J)*DX(I)*DY(J)
SUPERD(I)=-AD(I,J)
D(I)=AG(I,J)*TSOL(I,J-1)+AK(I,J)*TSOL(I,J+1)+SC(I,J)
*+AN0(I,J)*TSOL(I,J)+Hv(I,J)*TG(I,J)*DX(I)*DY(J)
ENDDO

CALL TDMA(M,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

```

DO I=2,M-1
TSOL(I,J)=TSRAHAT*S(I)+(1-TSRAHAT)*TSOL(I,J)
ENDDO
ENDDO

```

```

!SİMETRİ KOŞULUNDAN SINIR DÜZELTMESİ
DO J=1,N
TSOL(1,J)=TSOL(2,J)
TSOL(M,J)=TSOL(M-1,J)
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
! Alt yüzeydeki DUVAR sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,2)=0.0
SN(I,2)=0.0
AG(I,2)=0.0
ENDDO

```

```

DO I=L2,L7
! Alt yüzeydeki DUVAR sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,2)=0.0 !BOLTZ*EMMIS*((TINF**4)-(TSOL(I,1)**4))
SN(I,2)=0.0
AG(I,2)=0.0
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
! ÜST yüzeydeki DUVAR sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,N-1)=0.0 !BOLTZ*EMMIS*((TINF**4)-(TSOL(I,N)**4))
SN(I,N-1)=0.0
AK(I,N-1)=0.0
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
SUBD(J)=-AG(I,J)
DIAG(J)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)+AN0(I,J)
*+Hv(I,J)*DX(I)*DY(J)
SUPERD(J)=-AK(I,J)
D(J)=AB(I,J)*TSOL(I-1,J)+AD(I,J)*TSOL(I+1,J)+SC(I,J)
*+AN0(I,J)*TSOL(I,J)+Hv(I,J)*TG(I,J)*DX(I)*DY(J)
ENDDO

```

```

CALL TDMA(N,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

```

```

DO J=2,N-1
TSOL(I,J)=TSRAHAT*S(J)+(1-TSRAHAT)*TSOL(I,J)

```

ENDDO
ENDDO

DO I=1,M
TSOL(I,1)=TSOL(I,2)
TSOL(I,N)=TSOL(I,N-1)
ENDDO

TSHATA=0.0
DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
TSHATA=TSHATA+DABS((TSOL(I,J)-TSOLO(I,J)))
ENDDO
ENDDO

DO I=1,M
DO J=1,M
KS(I,J) = ((6.14217e04)*(TSOL(I,J)**(-1.03969)))
CPS(I,J)= (-1.64431E-10)*(TSOL(I,J)**4)+(1.11871E-06)*
*(TSOL(I,J)**3)-(2.83352E-3)*(TSOL(I,J)**2)+(3.20236*TSOL(I,J))
*-66.4959
ENDDO
ENDDO

!!! KATI SICAKLIK SONU

!!ENTALPI DENKLEM COZUMU !!!
DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
AN0(I,J)=POR(I,J)*ROgO(I,J)*DX(I)*DY(J)/(DT)
ENDDO
ENDDO

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
DD(I,J)= ROD(I,J)*Dz(I,J)*DY(J)/DXD(I)
DB(I,J)= ROB(I,J)*Dz(I,J)*DY(J)/DXB(I)
DK(I,J)= ROK(I,J)*Dz(I,J)*DX(I)/DYK(J)
DG(I,J)= ROGG(I,J)*Dz(I,J)*DX(I)/DYG(J)

FD(I,J)=UXd(I,J)*DY(J)
FB(I,J)=UXb(I,J)*DY(J)
FK(I,J)=UYk(I,J)*DX(I)
FG(I,J)=UYg(I,J)*DX(I)

```

PDC=ROD(I,J)*FD(I,J)/DD(I,J)
PBC=ROB(I,J)*FB(I,J)/DB(I,J)
PKC=ROK(I,J)*FK(I,J)/DK(I,J)
PGC=ROGG(I,J)*FG(I,J)/DG(I,J)

```

```

AD(I,J)=DD(I,J)*AMAX1(0.0,(1.0-0.1*abs(PDC))**(5))
*+AMAX1(-FD(I,J),0.0)
AB(I,J)=DB(I,J)*AMAX1(0.0,(1.0-0.1*abs(PBC))**(5))
*+AMAX1(FB(I,J),0.0)
AK(I,J)=DK(I,J)*AMAX1(0.0,(1.0-0.1*abs(PKC))**(5))
*+AMAX1(-FK(I,J),0.0)
AG(I,J)=DG(I,J)*AMAX1(0.0,(1.0-0.1*abs(PGC))**(5))
*+AMAX1(FG(I,J),0.0)

```

```

SC(I,J)=0
SN(I,J)=0
ENDDO
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
ENTHO(I,J)=ENTH(I,J)
END DO
END DO

```

```

DO J=2,N-1
! soldaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(2,J)=0.0
SN(2,J)=0.0
AB(2,J)=0.0
! sağdaki sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(M-1,J)=0.0
SN(M-1,J)=0.0
AD(M-1,J)=0.0
DO I=2,M-1
C.....Hesaplamanın başlaması
!Tüm düğüm noktaları için üç bant genişlikli matrisin katsayıları
SUBD(I)=-AB(I,J)
DIAG(I)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)+AN0(I,J)
SUPERD(I)=-AD(I,J)
D(I)=AG(I,J)*ENTH(I,J-1)+AK(I,J)*ENTH(I,J+1)+SC(I,J)
*+AN0(I,J)*ENTH(I,J)+(1.0/1.0)*Hv(I,J)*(TSOL(I,J)-TG(I,J))
**DX(I)*DY(J)/CPG(I,J)
ENDDO

```

```

CALL TDMA(M,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

```

```

DO I=2,M-1
ENTH(I,J)=HRAHAT*S(I)+(1-HRAHAT)*ENTHO(I,J)
ENDDO
ENDDO

```

```

!SİMETRİ KOŞULUNDAN SINIR DÜZELTMESİ
DO J=1,N
ENTH(1,J)=ENTH(2,J)
ENTH(M,J)=ENTH(M-1,J)
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
! ÜST yüzeydeki DUVAR sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,N-1)=0.0
SN(I,N-1)=0.0
AK(I,N-1)=0.0
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
! Alt yüzeydeki DUVAR sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,2)=0.0
SN(I,2)=0.0
AG(I,2)=0.0
ENDDO

```

```

DO I=L2,L7
! Alt yüzeydeki GİRİŞ sınır koşulu için katsayıların düzenlenmesi
SC(I,2)=ENTH(I,1)*DX(I)/DYG(2)
SN(I,2)=-DX(I)/DYG(2)
ENDDO

```

```

DO I=2,M-1
DO J=2,N-1
SUBD(J)=-AG(I,J)
DIAG(J)=AB(I,J)+AD(I,J)+AG(I,J)+AK(I,J)-SN(I,J)+AN0(I,J)
SUPERD(J)=-AK(I,J)
D(J)=AB(I,J)*ENTH(I-1,J)+AD(I,J)*ENTH(I+1,J)+SC(I,J)
*+AN0(I,J)*ENTH(I,J)+(1.0/1.0)*Hv(I,J)*(TSOL(I,J)-TG(I,J))
**DX(I)*DY(J)/CPG(I,J)
ENDDO

```

```

CALL TDMA(N,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)

```

```

DO J=2,N-1
ENTH(I,J)=HRAHAT*S(J)+(1-HRAHAT)*ENTH(I,J)

```


ENDDO

ENDDO

!DUVARLARDA SİMETRİ KOŞULU DÜZELTMESİ

DO I=1,M

ENTH(I,N)=ENTH(I,N-1)

ENDDO

DO I=2,L1

ENTH(I,1)=ENTH(I,2)

ENDDO

DO I=L8,M

ENTH(I,1)=ENTH(I,2)

ENDDO

HHATA=0.0

DO I=1,M

DO J=1,N

HHATA=HHATA+DABS((ENTH(I,J)-ENTHO(I,J)))/Hf

DFC(I,J)=(ENTH(I,J)-(Ho+MIXFRAC(I,J)*(Hf-Ho)))/1000.0

ENDDO

ENDDO

DO J=1,HH1

DO I=1,M

IF (DFC(I,J).LT.0.0) THEN

DFC(I,J)=0.0

ENDIF

ENDDO

ENDDO

!!! ENTALPI SONU

KF=MOD(SAY,20)

IF(KF.EQ.0) THEN

WRITE(14,'(I6,5F15.6)') SAY,MIXFRAC(M/2,N/2),ENTH(M/2,N/2),

*TSOL(M/2,N/2),TG(M/2,N/2)

ENDIF

KF=MOD(SAY,10000)

IF(KF.EQ.0) THEN

```
WRITE (OUTNVEL, 224) KI
224 FORMAT ('VEL', I3.3, '.DAT')
WRITE (OUTNFRA, 222) KI
222 FORMAT ('FRA', I3.3, '.DAT')
WRITE (OUTNTEM, 226) KI
226 FORMAT ('TEG', I3.3, '.DAT')
WRITE (OUTNTES, 228) KI
228 FORMAT ('TES', I3.3, '.DAT')
WRITE (OUTNENT, 230) KI
230 FORMAT ('ENT', I3.3, '.DAT')
WRITE (OUTNDFC, 232) KI
232 FORMAT ('DFC', I3.3, '.DAT')
WRITE (OUTNBAS, 234) KI
234 FORMAT ('BAS', I3.3, '.DAT')
```

```
OPEN(UNIT=51,FILE=OUTNVEL)
OPEN(UNIT=52,FILE=OUTNFRA)
OPEN(UNIT=53,FILE=OUTNTEM)
OPEN(UNIT=54,FILE=OUTNTES)
OPEN(UNIT=55,FILE=OUTNENT)
OPEN(UNIT=56,FILE=OUTNDFC)
OPEN(UNIT=57,FILE=OUTNBAS)
```

!! HIZ YAZDIR!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

WRITE(51,303) M,N

```
DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(51,'(4F15.6)') X(I),Y(J),UXSTAR(I,J),UYSTAR(I,J)
END DO
END DO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! YOGUNLUK YAZ!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
WRITE(53,305) M,N
```

```
DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(53,'(3F15.6)') X(I),Y(J),TG(I,J)
END DO
END DO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
WRITE(54,305) M,N
```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(54,'(3F15.6)') X(I),Y(J),TSOL(I,J)
END DO
END DO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
WRITE(55,305) M,N

```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(55,'(3F15.6)') X(I),Y(J),ENTH(I,J)
END DO
END DO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
WRITE(56,305) M,N

```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(56,'(3F15.6)') X(I),Y(J),DFC(I,J)
END DO
END DO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
WRITE(57,305) M,N

```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(57,'(3F15.6)') X(I),Y(J),P(I,J)
END DO
END DO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

! YOGUNLUK YAZ!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
WRITE(52,305) M,N

```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(52,'(3F15.6)') X(I),Y(J),MIXFRAC(I,J)
END DO
END DO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

KI=KI+1

```

```
ENDIF
! GİRİŞ ÇIKIŞ DEBİ KONTROLU
```

```
GIRIS=0.0
CIKIS=0.0
```

```
DO I=2,M-1
GIRIS=(DX(I)*UYSTAR(I,1)+GIRIS)
CIKIS=(DX(I)*UYSTAR(I,N)+CIKIS)
ENDDO
```

```
FARK=ABS((((GIRIS-CIKIS)/GIRIS)*100)
```

```
! HATA KONTROLÜ
```

```
KF=MOD(SAY,10)
IF(KF.EQ.0) THEN
WRITE(*,FORMAT) SAY,FARK,HATA,MFHATA,TSHATA
ENDIF
```

```
! PRINT*,SAY,'-',FARK,'-',HATA ,MFHATA,HHATA,TSHATA
```

```
ENDDO ! TEKRAR SONU
```

```
! GİRİŞ ÇIKIŞ DEBİ KONTROLU
```

```
GIRIS=0.0
CIKIS=0.0
```

```
DO I=2,M-1
GIRIS=(DX(I)*UYSTAR(I,1)+GIRIS)
CIKIS=(DX(I)*UYSTAR(I,N)+CIKIS)
ENDDO
```

```
FARK=ABS((((GIRIS-CIKIS)/GIRIS)*100)
```

```
print*, 'GIRIS=', GIRIS, '- ', 'CIKIS=', CIKIS, '- ', 'FARK=', FARK
```

```
WRITE(6,303) M,N
```

```
DO J=1,N
```

```
DO I=1,M
```

```

WRITE(6,'(4F15.6)') X(I),Y(J),UXSTAR(I,J),UYSTAR(I,J)
END DO
END DO

```

```

303 FORMAT('VARIABLES: "X"',/'"Y"',/'"UXSTAR"',/'"UYSTAR"',/'ZONE
*T="ZONE 01"',/,'I=',I4,',',',',J=',I4)

```

```

! BASINCI YAZ
WRITE(10,305) M,N

```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(10,'(3F15.6)') X(I),Y(J),P(I,J)
END DO
END DO

```

```

! GAS SICAKLIGI SIRALI

```

```

DO I=1,M
WRITE(4,'(5F15.6)') X(I),TG(I,30),TG(I,70),TG(I,110),TG(I,150)
END DO
! KATI SICAKLIGI SIRALI

```

```

DO I=1,M
WRITE(3,'(5F15.6)') X(I),TSOL(I,30),TSOL(I,70),TSOL(I,110)
*,TSOL(I,150)
END DO

```

```

DO I=1,M
WRITE(5,'(5F15.6)') X(I),MIXFRAC(I,30),MIXFRAC(I,70),
*MIXFRAC(I,110),MIXFRAC(I,150)
END DO

```

```

DO I=1,M
WRITE(13,'(5F15.6)') X(I),UYSTAR(I,30),UYSTAR(I,70),
*UYSTAR(I,110),UYSTAR(I,150)
END DO

```

```

DO J=1,N
WRITE(16,'(3F15.6)') Y(J),TG(M/2,J),TSOL(M/2,J)
END DO

```

```

!!! SON VERILERI YAZDIR

```

WRITE(8,305) M,N

```
DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(8,'(3F15.6)') X(I),Y(J),TG(I,J)
END DO
END DO
```

WRITE(9,305) M,N

```
DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(9,'(3F15.6)') X(I),Y(J),DFC(I,J)
END DO
END DO
```

WRITE(11,305) M,N

```
DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(11,'(3F15.6)') X(I),Y(J),TSOL(I,J)
END DO
END DO
WRITE(12,305) M,N
```

```
DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(12,'(3F15.6)') X(I),Y(J),HV(I,J)
END DO
END DO
```

WRITE(15,305) M,N

```
DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(15,'(3F15.6)') X(I),Y(J),MIXFRAC(I,J)
END DO
END DO
```

!! TURLERİ YAZDIRMA

!!!!!! TABLO OKUMA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

DO I=1,M !

DO J=1,N ! CALL TGAS(CH4,DFC(I,J),MIXFRAC(I,J),SCDRATE(I,J),DEFECT,SCDR,

```

*ZZ,TTG,O2,RO,N2,CPGAS)
CHDORT(I,J)=TTG
OIKI(I,J)=RO
NIKI(I,J)=CPGAS
ENDDO
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!! TABLO OKUMA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=1,M !
DO J=1,N !
CALL TGAS(CO2,DFC(I,J),MIXFRAC(I,J),SCDRATE(I,J),DEFECT,SCDR,
*ZZ,TTG,H2O,RO,CO,CPGAS)
COIKI(I,J)=TTG
HIKIO(I,J)=RO
COCOCO(I,J)=CPGAS
ENDDO
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!! TABLO OKUMA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=1,M !
DO J=1,N !

CALL TGAS(NO2,DFC(I,J),MIXFRAC(I,J),SCDRATE(I,J),DEFECT,SCDR,
*ZZ,TTG,NO,RO,HT,CPGAS)
NOIKI(I,J)=TTG
NONONO(I,J)=RO
HTHT(I,J)=CPGAS
ENDDO
ENDDO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

WRITE(30,305) M,N
WRITE(31,305) M,N
WRITE(32,305) M,N
WRITE(33,305) M,N
WRITE(34,305) M,N
WRITE(35,305) M,N
WRITE(36,305) M,N
WRITE(37,305) M,N
WRITE(17,305) M,N

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(30,'(3F15.6)') X(I),Y(J),CHDORT(I,J)
WRITE(31,'(3F15.6)') X(I),Y(J),OIKI(I,J)
WRITE(32,'(3F15.6)') X(I),Y(J),COIKI(I,J)
WRITE(33,'(3F15.6)') X(I),Y(J),HIKIO(I,J)
WRITE(34,'(3F15.6)') X(I),Y(J),COCOCO(I,J)

```

```

WRITE(35,'(3F15.6)') X(I),Y(J),NIKI(I,J)
WRITE(36,'(3F15.6)') X(I),Y(J),NONONO(I,J)
WRITE(37,'(3F15.6)') X(I),Y(J),NOIKI(I,J)
WRITE(17,'(3F15.6)') X(I),Y(J),HTHT(I,J)
END DO
END DO

```

```

DO J=1,N
WRITE(18,'(6F15.6)') Y(J),CHDORT(M/2,J),OIKI(M/2,J),COIKI(M/2,J)
*,HIKIO(M/2,J),NIKI(M/2,J)
END DO

```

```

WRITE(19,305) M,N

```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(19,'(3F15.6)') X(I),Y(J),KGA(I,J)
END DO
END DO

```

```

WRITE(20,305) M,N

```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(20,'(3F15.6)') X(I),Y(J),MUV(I,J)
END DO
END DO

```

```

305 FORMAT('VARIABLES: "X"',/'"Y"',/'"T"',/'ZONE T="ZONE 01"',/
*'I=',I4,',',',',J=',I4)

```

```

WRITE(7,305) M,N

```

```

DO J=1,N
DO I=1,M
WRITE(7,'(3F15.6)') X(I),Y(J),SCDRATE(I,J)
END DO
END DO

```

```

12 FORMAT('VARIABLES: "Y"',/'"T"',/'ZONE T="ZONE 01"',/
*'I=',I4,',',',',J=',I4)

```



```
STOP  
END
```

```
FUNCTION A(P)  
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)  
ZERO=0.0  
PA=(1.0-0.1*DABS(P))**5  
A=DMAX1(ZERO,PA)  
RETURN  
END
```


EK A.2

```
SUBROUTINE GERX(M,MM,X,XB,DD,ALPHAX)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION X(M),XB(MM)
C.....
C...STREACHING FOR X DIRECTION.....
C.....
K=(MM-1)/2+1
DAMX=0.0
DO 10 I=1,K-1
DAMX=DAMX+ALPHAX**(I-1)
10 CONTINUE
DXB=DD/DAMX/2.0
XB(1)=0.0
DO 20 I=2,K
XB(I)=XB(I-1)+DXB*ALPHAX**(I-2)
20 CONTINUE
XB(MM)=DD
DO 30 I=MM-1,K,-1
XB(I)=XB(I+1)-DXB*ALPHAX**(MM-1-I)
30 CONTINUE

X(1)=0.0
X(M)=DD

DO I=2,MM
X(I)=XB(I-1)+(XB(I)-XB(I-1))/2.0
ENDDO

RETURN
END
```

```
SUBROUTINE GERY(N,NN,Y,YB,DD,ALPHAY)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(N),YB(NN)
C.....
C...STREACHING FOR Y DIRECTION.....
C.....
K=(NN-1)/2+1
DAMY=0.0
DO 10 I=1,K-1
DAMY=DAMY+ALPHAY**(I-1)
```

```

10 CONTINUE
DYB=DD/DAMY/2.0
YB(1)=0.0
DO 20 I=2,K
YB(I)=YB(I-1)+DYB*ALPHAY**(I-2)
20 CONTINUE
YB(NN)=DD
DO 30 I=NN-1,K,-1
YB(I)=YB(I+1)-DYB*ALPHAY**(NN-1-I)
30 CONTINUE

```

```

Y(1)=0.0
Y(N)=DD

```

```

DO I=2,NN
Y(I)=YB(I-1)+(YB(I)-YB(I-1))/2.0
ENDDO

```

```

RETURN
END

```

EK A.3

```
SUBROUTINE TDMA(L,DIAG,SUPERD,SUBD,D,S)
REAL(KIND = 8),DIMENSION(L)::SUBD,DIAG,SUPERD,D,S
DO I=3,L-1
  CARP=SUBD(I)/DIAG(I-1)
  DIAG(I)=DIAG(I)-CARP*SUPERD(I-1)
  D(I)=D(I)-CARP*D(I-1)
ENDDO
S(L-1)=D(L-1)/DIAG(L-1)
DO I=L-2,2,-1
  S(I)=(D(I)-SUPERD(I)*S(I+1))/DIAG(I)
ENDDO
RETURN
END
```


EK A.4

```
SUBROUTINE OKUMA(TABLO,DEFECTX,ZX,SCDRX,DEFECT,SCDR,Z,TTGAS,YOG
*,ROO,CSCS,CPGG,FO2,FN2,FH2O,FCO2,FCH4,FK1,FK2,FK3,FK4,FK5)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
INTEGER :: I,J,M,K
PARAMETER(M=100)
REAL(KIND = 8),DIMENSION(10,11,M)::TABLO,YOG,CSCS
REAL(KIND = 8),DIMENSION(10,11,M)::FO2,FN2,FH2O,FCO2,FCH4
REAL(KIND = 8),DIMENSION(10,M)::Z
REAL(KIND = 8),DIMENSION(10)::DEFECT
REAL(KIND = 8),DIMENSION(10,11):: SCDR
REAL(KIND = 8) DEFECTX,SCDRX,ZX
REAL(KIND = 8) TTGAS,ROO,CPGG
REAL(KIND = 8) FK1,FK2,FK3,FK4,FK5
REAL(KIND = 8),DIMENSION(2)::DD,TS,TZ
REAL(KIND = 8),DIMENSION(2,2)::SS
REAL(KIND = 8),DIMENSION(2,2,2)::ZZZ
INTEGER,DIMENSION(2)::D
INTEGER,DIMENSION(2,2)::S
INTEGER,DIMENSION(2,2,2)::ZZ
```

! 3 BOYUTLU ITERASYON İLE SICAKLIK BULMA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```
!! DEFECT ARALIĞI BULMA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! MAKSIMUM DEFECT'TEN BUYUK OLMA KOŞULU !!!!! !
IF (DEFECTX.GT.DEFECT(1)) THEN !!
D(1)=1 !!
D(2)=1 !!
DD(1)=DEFECT(1) !!
DD(2)=DEFECT(1) !!
GOTO 1 !!
ENDIF !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !
!! MIMIMUM DEFECT'TEN KUCUK OLMA KOŞULU !!!!!!! !
IF (DEFECTX.LT.DEFECT(10)) THEN !!
D(1)=10 !!
D(2)=10 !!
DD(1)=DEFECT(10) !!
DD(2)=DEFECT(10) !!
GOTO 1 !!
ENDIF !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! EŞİTLİK DURUMU !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```

DO I=1,10 !!
IF (DEFECTX.EQ.DEFECT(I)) THEN !!
D(1)=I !!
D(2)=I !!
DD(1)=DEFECT(I) !!
DD(2)=DEFECT(I) !!
GOTO 1 !!
ENDIF !!
ENDDO !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! ARA DEĞERLER İÇİN!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=1,9 !!
IF (DEFECTX.LT.DEFECT(I).AND.DEFECTX.GT.DEFECT(I+1)) THEN
D(1)=I !!
D(2)=I+1 !!
DD(1)=DEFECT(I) !!
DD(2)=DEFECT(I+1) !!
GOTO 1 !!
ENDIF !!
ENDDO !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!! SCDR ARALIĞI BULMA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
1 DO J=1,2 !
!! MAKSIMUM SCDR'DEN BUYUK OLMASI!!!! !
IF (SCDRX.GT.SCDR(D(J),1)) THEN !!
S(J,1)=1 !!
S(J,2)=1 !!
SS(J,1)=SCDR(D(J),1) !!
SS(J,2)=SCDR(D(J),1) !!
GOTO 2 !!
ENDIF !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! MINIMUM SCDR'DEN KUCUK OLMASI!!!!!!
IF (SCDRX.LT.SCDR(D(J),11)) THEN !
S(J,1)=11 !
S(J,2)=11 !
SS(J,1)=SCDR(D(J),11) !
SS(J,2)=SCDR(D(J),11) !
GOTO 2 !
ENDIF !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! EŞİTLİK KOŞULU!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=1,11 !
IF (SCDRX.EQ.SCDR(D(J),I)) THEN !

```



```

S(J,1)=I !
S(J,2)=I !
SS(J,1)=SCDR(D(J),I) !
SS(J,2)=SCDR(D(J),I) !
GOTO 2 !
ENDIF !
ENDDO !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! ARA DEĞERLER İÇİN !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO I=1,10 ! !
IF (SCDRX.LT.SCDR(D(J),I).AND.SCDRX.GT.SCDR(D(J),I+1)) THEN ! !
S(J,1)=I ! !
S(J,2)=I+1 ! !
SS(J,1)=SCDR(D(J),I) ! !
SS(J,2)=SCDR(D(J),I+1) ! !
GOTO 2 ! !
ENDIF ! !
ENDDO ! !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !
!! D1=D2 İSE !!!!!!!!!!!!!!! !
2 IF (D(1).EQ.D(2)) THEN ! !
S(2,1)=S(1,1) ! !
S(2,2)=S(1,2) ! !
SS(2,1)=SS(1,1) ! !
SS(2,2)=SS(1,2) ! !
GOTO 3 ! !
ENDIF ! !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !
ENDDO !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!! MIXTURE FRACTION (Z) ARALIĞI BULMA !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
3 CONTINUE !
!
DO J=1,2 !
DO I=1,2 !
!! MAX KOŞULU !!!!!!!!!!! !
IF (ZX.GT.1) THEN ! !
ZZ(J,I,1)=1 ! !
ZZ(J,I,2)=1 ! !
ZZZ(J,I,1)=Z(D(J),1) ! !
ZZZ(J,I,2)=Z(D(J),1) ! !
GOTO 4 ! !
ENDIF ! !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! !! MIN KOŞULU !!!!!!!!!!!!!!! IF (ZX.LT.0) THEN ! !
ZZ(J,I,1)=100 ! !
ZZ(J,I,2)=100 ! !
ZZZ(J,I,1)=Z(D(J),100) ! !

```

```

ZZZ(J,I,2)=Z(D(J),100) !!
GOTO 4 !!
ENDIF !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! EŞİTLİK KOŞULU !!!!!!!!!!!
DO K=1,100 !!
IF (ZX.EQ.Z(D(J),K)) THEN !!
ZZ(J,I,1)=K !!
ZZ(J,I,2)=K !!
ZZZ(J,I,1)=Z(D(J),K) !!
ZZZ(J,I,2)=Z(D(J),K) !!
GOTO 4 !!
ENDIF !!
ENDDO !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! ARA DEĞERLERDE İSE !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO K=1,99 !!
IF (ZX.LT.Z(D(J),K).AND.ZX.GT.Z(D(J),K+1)) THEN !
ZZ(J,I,1)=K !!
ZZ(J,I,2)=K+1 !!
ZZZ(J,I,1)=Z(D(J),K) !!
ZZZ(J,I,2)=Z(D(J),K+1) !!
GOTO 4 !!
ENDIF !!
ENDDO !!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! SCDR TAM DEĞERE DENK GELİYORSA !!!
4 IF(S(J,1).EQ.S(J,2)) THEN !
ZZ(J,2,1)=ZZ(J,1,1) !
ZZ(J,2,2)=ZZ(J,1,2) !
ZZZ(J,2,1)=ZZZ(J,1,1) !
ZZZ(J,2,2)=ZZZ(J,1,2) !
GOTO 5 !
ENDIF !
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
5 ENDDO
ENDDO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!! INTERPOLASYON YAPIMI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,2
DO I=1,2
IF (ZZ(J,I,1).EQ.ZZ(J,I,2)) THEN
TZ(I)=TABLO(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))
GOTO 6
ENDIF
TZ(I)=TABLO(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))+((ZX-ZZZ(J,I,2))/(ZZZ(J,I,1)-
*ZZZ(J,I,2)))*(TABLO(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,1))-

```

```

*TABLO(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))
6 CONTINUE
ENDDO

```

```

IF (SS(J,1).EQ.SS(J,2)) THEN
TS(J)=TZ(1)
GOTO 7
ENDIF
TS(J)=TZ(2)+((SCDRX-SS(J,2))/(SS(J,1)-SS(J,2)))*(TZ(1)-TZ(2))
7 CONTINUE
ENDDO

```

```

IF (TS(1).EQ.TS(2)) THEN
TTGAS=TS(1)
GOTO 8
ENDIF
TTGAS=TS(2)+((DEFECTX-DD(2))/(DD(1)-DD(2)))*(TS(1)-TS(2))
8 CONTINUE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

!! INTERPOLASYON YAPIMI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,2 !
DO I=1,2 !
IF (ZZ(J,I,1).EQ.ZZ(J,I,2)) THEN
TZ(I)=YOG(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))
GOTO 9
ENDIF
TZ(I)=YOG(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))+((ZX-ZZZ(J,I,2))/(ZZZ(J,I,1)
*-ZZZ(J,I,2)))*(YOG(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,1))-
*YOG(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2)))
9 CONTINUE
ENDDO

```

```

IF (SS(J,1).EQ.SS(J,2)) THEN
TS(J)=TZ(1)
GOTO 10
ENDIF
TS(J)=TZ(2)+((SCDRX-SS(J,2))/(SS(J,1)-SS(J,2)))*(TZ(1)-TZ(2))
10 CONTINUE
ENDDO

```

```

IF (TS(1).EQ.TS(2)) THEN
ROO=TS(1)
GOTO 11
ENDIF
ROO=TS(2)+((DEFECTX-DD(2))/(DD(1)-DD(2)))*(TS(1)-TS(2))
11 CONTINUE

```

!!

!! INTERPOLASYON YAPIMI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```
DO J=1,2 !
DO I=1,2 !
IF (ZZ(J,I,1).EQ.ZZ(J,I,2)) THEN !
TZ(I)=CSCS(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2)) !
GOTO 12 !
ENDIF !
TZ(I)=CSCS(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))+((ZX-ZZZ(J,I,2))/(ZZZ(J,I,1) !
*-ZZZ(J,I,2)))*(CSCS(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,1))- !
*CSCS (D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))) !
12 CONTINUE !
ENDDO !
!
IF (SS(J,1).EQ.SS(J,2)) THEN
TS(J)=TZ(1)
GOTO 13
ENDIF
TS(J)=TZ(2)+((SCDRX-SS(J,2))/(SS(J,1)-SS(J,2)))*(TZ(1)-TZ(2))
13 CONTINUE
ENDDO
```

```
IF (TS(1).EQ.TS(2)) THEN !
CPGG=TS(1) !
GOTO 14 !
ENDIF !
CPGG=TS(2)+((DEFECTX-DD(2))/(DD(1)-DD(2)))*(TS(1)-TS(2))
14 CONTINUE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

!! INTERPOLASYON YAPIMI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```
DO J=1,2 !
DO I=1,2 !
IF (ZZ(J,I,1).EQ.ZZ(J,I,2)) THEN
TZ(I)=FO2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))
GOTO 15
ENDIF
TZ(I)=FO2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))+((ZX-ZZZ(J,I,2))/(ZZZ(J,I,1)
*-ZZZ(J,I,2)))*(FO2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,1))-
*FO2 (D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2)))
15 CONTINUE
ENDDO
```

```
IF (SS(J,1).EQ.SS(J,2)) THEN
TS(J)=TZ(1)
GOTO 16
```

```

ENDIF
TS(J)=TZ(2)+((SCDRX-SS(J,2))/(SS(J,1)-SS(J,2)))*(TZ(1)-TZ(2))
16 CONTINUE
ENDDO

```

```

IF (TS(1).EQ.TS(2)) THEN
FK1=TS(1)
GOTO 17
ENDIF
FK1=TS(2)+((DEFECTX-DD(2))/(DD(1)-DD(2)))*(TS(1)-TS(2))
17 CONTINUE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

!! INTERPOLASYON YAPIMI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,2 !
DO I=1,2 !
IF (ZZ(J,I,1).EQ.ZZ(J,I,2)) THEN
TZ(I)=FN2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))
GOTO 18
ENDIF
TZ(I)=FN2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))+((ZX-ZZZ(J,I,2))/(ZZZ(J,I,1)
*-ZZZ(J,I,2)))*(FN2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,1))-
*FN2 (D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2)))
18 CONTINUE
ENDDO

```

```

IF (SS(J,1).EQ.SS(J,2)) THEN
TS(J)=TZ(1)
GOTO 19
ENDIF
TS(J)=TZ(2)+((SCDRX-SS(J,2))/(SS(J,1)-SS(J,2)))*(TZ(1)-TZ(2))
19 CONTINUE
ENDDO

```

```

IF (TS(1).EQ.TS(2)) THEN
FK2=TS(1)
GOTO 20
ENDIF
FK2=TS(2)+((DEFECTX-DD(2))/(DD(1)-DD(2)))*(TS(1)-TS(2))
20 CONTINUE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

!! INTERPOLASYON YAPIMI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,2
DO I=1,2
IF (ZZ(J,I,1).EQ.ZZ(J,I,2)) THEN
TZ(I)=FH2O(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))

```

```

GOTO 21
ENDIF
TZ(I)=FH2O(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))+((ZX-ZZZ(J,I,2))/(ZZZ(J,I,1)
*-ZZZ(J,I,2)))*(FH2O(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,1))-
*FH2O (D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2)))
21 CONTINUE
ENDDO

IF (SS(J,1).EQ.SS(J,2)) THEN
TS(J)=TZ(1)
GOTO 22
ENDIF
TS(J)=TZ(2)+((SCDRX-SS(J,2))/(SS(J,1)-SS(J,2)))*(TZ(1)-TZ(2))
22 CONTINUE
ENDDO

IF (TS(1).EQ.TS(2)) THEN
FK3=TS(1)
GOTO 23
ENDIF
FK3=TS(2)+((DEFECTX-DD(2))/(DD(1)-DD(2)))*(TS(1)-TS(2))
23 CONTINUE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!! INTERPOLASYON YAPIMI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,2
DO I=1,2
IF (ZZ(J,I,1).EQ.ZZ(J,I,2)) THEN
TZ(I)=FCO2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))
GOTO 24
ENDIF
TZ(I)=FCO2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))+((ZX-ZZZ(J,I,2))/(ZZZ(J,I,1)
*-ZZZ(J,I,2)))*(FCO2(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,1))-
*FCO2 (D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2)))
24 CONTINUE
ENDDO

IF (SS(J,1).EQ.SS(J,2)) THEN
TS(J)=TZ(1)
GOTO 25
ENDIF
TS(J)=TZ(2)+((SCDRX-SS(J,2))/(SS(J,1)-SS(J,2)))*(TZ(1)-TZ(2))
25 CONTINUE
ENDDO

IF (TS(1).EQ.TS(2)) THEN
FK4=TS(1)

```

```

GOTO 26
ENDIF
FK4=TS(2)+((DEFECTX-DD(2))/(DD(1)-DD(2)))*(TS(1)-TS(2))
26 CONTINUE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!! INTERPOLASYON YAPIMI !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
DO J=1,2
DO I=1,2
IF (ZZ(J,I,1).EQ.ZZ(J,I,2)) THEN
TZ(I)=FCH4(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))
GOTO 27
ENDIF
TZ(I)=FCH4(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2))+((ZX-ZZZ(J,I,2))/(ZZZ(J,I,1)
*-ZZZ(J,I,2)))*(FCH4(D(J),S(J,I),ZZ(J,I,1))-
*FCH4 (D(J),S(J,I),ZZ(J,I,2)))
27 CONTINUE
ENDDO

IF (SS(J,1).EQ.SS(J,2)) THEN
TS(J)=TZ(1)
GOTO 28
ENDIF
TS(J)=TZ(2)+((SCDRX-SS(J,2))/(SS(J,1)-SS(J,2)))*(TZ(1)-TZ(2))
28 CONTINUE
ENDDO

IF (TS(1).EQ.TS(2)) THEN
FK5=TS(1)
GOTO 29
ENDIF
FK5=TS(2)+((DEFECTX-DD(2))/(DD(1)-DD(2)))*(TS(1)-TS(2))
29 CONTINUE
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

RETURN
END !! PROGRAM SONU

```


EK A.5

```
SUBROUTINE TRANSPORT(TGA,FO2,FN2,FCO2,FH2O,FCH4,TTT,COND)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
INTEGER :: I
```

```
REAL(KIND = 8),DIMENSION(5)::CONS,SIG,VIZ,MW,XX,CPR,RC,CP,CV,KK,KI
REAL(KIND = 8),DIMENSION(2,5)::A1,A2,A3,A4,A5
REAL(KIND = 8) OME,RTEM,TEM,CCC,SSS,TTT,COND
REAL(KIND = 8) FO2,FN2,FH2O,FCO2,FCH4,TGA
```

!! O2 SABİTLERİ

```
CONS(1)=107.4
SIG(1)=3.458
MW(1)=32.0
RC(1)=0.26
A1(1,1)= 3.66096083
A2(1,1)= 5.56365523E-04
A3(1,1)=-1.41149485E-07
A4(1,1)= 2.05797658E-11
A5(1,1)=-1.29913247E-15
A1(2,1)= 3.78245636
A2(2,1)=-2.96673415E-03
A3(2,1)= 9.84730200E-06
A4(2,1)=-9.68129508E-09
A5(2,1)= 3.24372836E-12
```

!! N2 SABİTLERİ

```
CONS(2)=97.53
SIG(2)=3.621
MW(2)=28.0
RC(2)=0.297
A1(1,2)= 2.95257626
A2(1,2)= 1.39690057E-03
A3(1,2)=-4.92631691E-07
A4(1,2)= 7.86010367E-11
A5(1,2)=-4.60755321E-15
A1(2,2)= 3.53100528
A2(2,2)=-1.23660987E-04
A3(2,2)=-5.02999437E-07
A4(2,2)= 2.43530612E-09
A5(2,2)=-1.40881235E-12
```

!! H2O SABİTLERİ

CONS(3)=572.4

SIG(3)=2.605

MW(3)=18.0

RC(3)=0.462

A1(1,3)= 2.67703787

A2(1,3)= 2.97318329E-03

A3(1,3)=-7.73769690E-07

A4(1,3)= 9.44336689E-11

A5(1,3)=-4.26300959E-15

A1(2,3)= 4.19864056

A2(2,3)=-2.03643410E-03

A3(2,3)= 6.52040211E-06

A4(2,3)=-5.46797062E-09

A5(2,3)= 1.77197817E-12

!! CO2 SABİTLERİ

CONS(4)=244.0

SIG(4)=3.763

MW(4)=44.0

RC(4)=0.189

A1(1,4)= 4.63659493

A2(1,4)= 2.74131991E-03

A3(1,4)=-9.95828531E-07

A4(1,4)= 1.60373011E-10

A5(1,4)=-9.13103468E-15

A1(2,4)= 2.35677352

A2(2,4)= 8.98459677E-03

A3(2,4)=-7.12356269E-06

A4(2,4)= 2.45919022E-09

A5(2,4)=-1.43699548E-13

!! CH4 SABİTLERİ

CONS(5)=141.4

SIG(5)=3.746

MW(5)=16.0

RC(5)=0.518

A1(1,5)= 1.63552643

A2(1,5)= 1.00842795E-02

A3(1,5)=-3.36916254E-06

A4(1,5)= 5.34958667E-10

A5(1,5)=-3.15518833E-14

A1(2,5)= 5.14987613

A2(2,5)=-1.36709788E-02

A3(2,5)= 4.91800599E-05

A4(2,5)=-4.84743026E-08

A5(2,5)= 1.66693956E-11

!! PROGRAMDAN GELİCEK MOL KESİRLERİ VE SICAKLIK

XX(1)=FO2

XX(2)=FN2

XX(3)=FH2O

XX(4)=FCO2

XX(5)=FCH4

TEM=TGA

IF (TEM.GT.1000.0) THEN

DO I=1,5

CPR(I)=A1(1,I)+A2(1,I)*TEM+A3(1,I)*(TEM**2)+A4(1,I)*(TEM**3)
+A5(1,I)(TEM**4)

ENDDO

ELSE

DO I=1,5

CPR(I)=A1(2,I)+A2(2,I)*TEM+A3(2,I)*(TEM**2)+A4(2,I)*(TEM**3)
+A5(2,I)(TEM**4)

ENDDO

ENDIF

DO I=1,5

CP(I)=CPR(I)/RC(I) !KJ/KG

CV(I)=CP(I)-RC(I) !KJ/KG

KK(I)=CP(I)/CV(I)

ENDDO

DO I=1,5

RTEM=TEM/CONS(I)

OME=(1.147*RTEM**(-0.145))+(RTEM+0.5)**(-2)

VIZ(I)=((2.6693E-05)*((MW(I)*TEM)**(0.5))/(SIG(I)*OME))*0.1

ENDDO

CCC=0.0

TTT=0.0

DO I=1,5

DO J=1,5

CCC=CCC+((1/SQRT(8.0))*((1+MW(I)/MW(J))**(-0.5))*(1+((VIZ(I)
*/VIZ(J))** (0.5))*((MW(J)/MW(I))** (0.25))))** (2.0))

ENDDO

TTT=TTT+(XX(I)*VIZ(I)/CCC)

ENDDO

DO I=1,5

KI(I)=0.25*(9*KK(I)-5)*VIZ(I)*CV(I)

ENDDO

```
CCC=0.0
SSS=0.0
DO I=1,5
CCC=CCC+(XX(I)*KI(I))
SSS=SSS+(XX(I)/KI(I))
ENDDO

COND=(CCC+1.0/SSS)

RETURN
END !! PROGRAM SONU
```

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Tanju ERGEN

Doğum Tarihi ve Yeri: 1989, Tekirdağ

E-Posta: tanjuergen@outlook.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2013, İTÜ, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği
- **Lisans:** 2013, İTÜ, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2013-2016 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Ergen T., Tunçer O., Baytaş, A. C., 2014. Numerical Investigation of a 5 kW Porous Medium Burner with an Integrated Heat Exchanger. *International Congress - Convective Heat and Mass Transfer*, June 08-14, 2014 Kuşadası, Turkey.
- Ergen T., Tunçer O., Baytaş, A. C., 2014. Dü,sey Bir Gözenekli Kanalda Yanmanın Isıl Dengesiz Model İle Sayısal İncelenmesi. *Ulusal Isı Bilimi ve Teknigi Kongresi*, September 02-05, 2015 Balıkesir, Turkey.