

Yakıt Olarak Metan ve Biyokütleden Piroliz Yöntemi İle Elde Edilen Sentetik Gaz
Kullanan Bir Mikrotürbinin Dairesel Yanma Odasındaki Yanmanın Akışkanlar
Dinamiği Simülasyonu

Volkan Tatar

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2010

CFD SIMULATION OF A MICROTURBINE ANNULAR COMBUSTION
CHAMBER FUELLED WITH METHANE AND BIOMASS PYROLYSIS SYNGAS

Volkan Tatar

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

August 2010

YAKIT OLARAK METAN VE BİYOKÜTLEDEN PİROLİZ YÖNTEMİ İLE ELDE
EDİLEN SENTETİK GAZ KULLANAN BİR MİKROTÜRBİNİN DAİRESEL YANMA
ODASINDAKİ YANMANIN AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ SİMÜLASYONU

Volkan TATAR

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Ve Termodinamik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Haydar ARAS

Ağustos 2010

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Volkan TATAR'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Yakıt Olarak Metan ve Biyokütleden Piroлиз Yöntemi İle Elde Edilen Sentetik Gaz Kullanan Bir Mikrotürbinin Dairesel Yanma Odasındaki Yanmanın Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Haydar ARAS

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. L.Berrin ERBAY

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Ertunç TAT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ümit ER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ANKARA

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Mikro gaz türbinleri, enerji dağıtımli üretim, ayrıca bileşik piroliz ve/veya gazlaştırma işlemleri yoluyla elde edilen biyokütleden sağlanan düşük ısı değerli yakıttan yararlanmak için avantajlı bir biçimde kullanılabilir. Bu sentetik gazlar, doğal gaz kullanımında (oluşum, düşük kalori değeri, hidrojen içeriği, tar ve partikül madde içeriği açısından) oluşabilecek yanma problemleri, yanma dengesizlikleri, emisyon ve kirlenme kontrol zorlukları gibi faktörler için önemli farklılıklar göstermektedir.

Yanma odasının HAD simülasyonu, bu gazların kullanımı sırasında oluşabilecek temel kriterleri belirlemek, var olan geometrileri düzeltmek ve düşük ısı gazlarla kullanılacak yeni yanma odalarının geliştirilmesi için anahtar bir araçtır.

Bu çalışma, biyokütleden türetilen yakıtın kullanılabilme imkânını araştırmak ve mikro türbin çember yanma hücresi içinde gerçekleşen yanma sürecinin analiz etmek için gerçekleştirilen deneysel ve nümerik araştırmaları içermektedir. Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilen bir yanma sürecinin HAD çalışması ortaya konulmakta ve sonuçlar açıklanmaktadır. Özellikle amaçlanan; birleşik bir piroliz gaz üretim ve mikro türbin tesisinde katı biyokütleden elde edilen sentetik gazın mikro türbinde kullanım olasılığının incelenmesidir. Mikro türbin uygulamasında doğal gaz için farklı güç değerlerinde deneysel ve HAD benzetim faaliyeti gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar uygun nümerik araştırmanın gerçekleştirilebilmesi için bu çalışmada anlatılmış ve kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yanma odası, hesaplamalı akışkan dinamiği, yanma, mikro türbin, doğal gaz.

SUMMARY

Micro gas turbines could be profitably used, for distributed energy production, also exploiting low calorific value biomass derived fuels, obtained by means of integrated pyrolysis and/or gasification processes. These synthesis gases show significant differences with respect to natural gas (in terms of composition, low calorific value, hydrogen content, tar and particulate matter content) that may turn into ignition problems, combustion instabilities, difficulties in emission control and fouling.

CFD simulation of the combustion chamber is a key instrument to identify main criticalities arising when using these gases, in order to modify existing geometries and to develop new generation combustion chambers for use with low calorific value gases.

This study describes the numerical and experimental activity carried out to analyze the combustion process occurring inside an existing microturbine annular combustor and to investigate the possibility to fuel it with biomass derived fuels. A CFD study of the combustion process performed with Fluent codes is introduced and some results are reported. In particular, the aim is to introduce in the microturbine the syngas obtained from pyrolysis of solid biomass, in the framework of a Integrated Pyrolysis Regenerated Plant. Experimental campaign on the microturbine operation with natural gas has been performed, with variable output power. Results of the measurements are presented and used in this study to tune the subsequent numerical investigation.

Keywords: Combustion chamber, computational fluid dynamics, combustion, micro turbine,
natural gas

TEŞEKKÜR

Derslerimde ve tez çalışmamda bana danışmalık ederek, beni yönlendiren ve bana ışık tutan sevgili danışman hocam Doç. Dr. Haydar ARAS'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca İtalya'da bulunduğum süre boyunca benden yardımını esirgemeyen Danışmanım Prof. Emilio FERRARI ve Prof. Antonio PERETTO'ya teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük paya sahip olan, maddi ve manevi desteklerini her an yanımda hissettiğim anneme ve babama şükranlarımı sunar, gösterdikleri sabır ve ilgiden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. BİYOKÜTLE VE DOĞAL GAZ.....	4
2.1 Biyokütle.....	4
2.2 Biyokütle Çevrim Teknolojisi.....	5
2.2.1 Doğrudan yakma.....	5
2.2.2 Havasız Çürütme	6
2.2.3 Fermantasyon	6
2.2.4 Piroliz	6
2.2.5 Gazlaştırma	7
2.2.6 Biyofotoliz.....	7
2.3 Doğal Gaz.....	8
2.4 Yanma.....	9
2.5 Yanma Hesabı.....	9
3. HAD TARİHSEL GELİŞİMİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	13
3.1 Giriş	13
3.2 Bir HAD Kodunun Çalışma Prensibi	15
3.2.1 Ön işlemci.....	15
3.2.1 Çözücü.....	16
3.2.3 Son işlemci.....	16
4. MİKRO TÜRBİN.....	18

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.1 Giriş	18
4.2 Mikro Gaz Türbini	18
4.2.1 Termodinamik ısı çevrimi	21
4.2.2 Mikro türbinlerin avantajları ve dezavantajları	21
4.2.3 Mikro Türbin Market Sahası	22
5. YANMA ODASI	23
5.1 Giriş	23
5.2 Yanma Odası Çeşitleri	23
5.2.1 Boru şeklinde yanma odası.....	23
5.2.2 Boru-dairesel yanma odası	24
5.2.3 Dairesel yanma odası.....	24
5.3. Yanma Odası Genel Düzeni.....	25
5.3.1 Diffüzör	26
5.3.2 Gövde ve gömlek.....	26
5.3.3 Yakıt enjektörü.....	26
5.3.4 Alev dengeleyici.....	27
5.3.5 Havalandırma	27
6. DENEYSEL ANALİZ VE HAD GENEL BAKIŞ.....	28
6.1 Giriş.....	28
6.2 Deney Düzeneği.....	28
6.3 Mikro Türbin Yanma Odası Karakteristiği.....	30
6.4 Deneysel Çalışma.....	31
6.5 Nümerik Analiz Yönetimi.....	35
6.5.1 Nümerik modelleme yaklaşımı	35
6.5.2 Sınır koşulları	39
6.5.3 Geometrinin modellenmesi.....	41

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7. SAYISAL ANALİZ ÇALIŞMA.....	43
7.1 Doğal Gaz İçin Durum Çalışması.....	43
7.2 Sentetik Gaz İçin Durum Çalışması	46
7.3 2D Simülasyon İçin Gereken Hesaplamalar	51
8. HAD SAYISAL MODELLEME SONUÇLARI	54
8.1 Sonuçlar ve Karşılaştırmalar	54
8.2 İlgili Düzlemlerdeki Sonuçların Görselleştirilmesi	58
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
EK AÇIKLAMALAR-A	
EK AÇIKLAMALAR-B	
EK AÇIKLAMALAR-C	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Mikro türbin motorunun genel modeli	19
4.2 Capstone C200 model mikro türbin	20
4.3 Capstone C30 model mikro türbin	20
5.1 Boru şeklinde yanma odası	24
5.2 Boru-dairesel biçimli yanma odası	25
5.3 Dairesel yanma odası.....	26
5.4 Yanma odası genel görünümü	26
6.1 Birleşik piroliz-MGT deney düzeneği	30
6.2 Çalışılan MGT yanma odası gömleği ve zengin bölge karışım borusu	32
6.3 MGT deney düzeneği şematik gösterimi	33
6.4 MGT yükleme-sıcaklık grafiği (a)	34
6.4 MGT yükleme-basınç grafiği (b)	34
6.5 Deney sonuçlarına göre hesaplanmış verimlilik değerleri	35
6.6 Basit geometride çalışılan yanma modeli sonuçları	37
6.7 CH_4 -hava flamelet modeli sıcaklık dağılımı	40
6.8 SG-hava flamelet modeli sıcaklık dağılımı	40
6.9 Metan yanması için geometri modeli (a)	42
6.9 SG yanması için geometri modeli (b)	42
6.10 Metan için yakıt nozulu (a)	42
6.10 SG için yakıt nozulu (b)	42
6.11 HAD yazılımında kullanılacak temel geometri	43
6.12 Ağ yapısının ve oluşturulan hacimlerin görünümü (x-y düzlemi)	44
6.13 Ağ yapısının 2D görünümü (x-y) düzlemi	45
7.1 2D geometrinin şematik gösterimi	53
7.2 İkincil hava kanalı eşdeğer boşluğu	54
8.1 Sıcaklık dağılımının (x-y) düzleminde görünümü Flamelet-GRI (a)	56
8.1 Sıcaklık dağılımının (x-y) düzleminde görünümü ED-FR J.&L. (b)	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
8.2	Sıcaklık dağılımının karışım tüpü kesitinde görünümü Flamelet-GRI (a) ..	57
8.2	Sıcaklık dağılımının karışım tüpü kesitinde görünümü ED-FR J.&L. (b) ...	57
8.3	Karışım tüpünün farklı bölgelerindeki ortalama sıcaklık değerleri	58
8.4	MGT yüklemesine karşın HAD ve deneysel NO emisyonu (Metan-hava)..	59
8.4	MGT yüklemesine karşın HAD ve deneysel CO emisyonu (Metan-hava)..	59
8.5	Sonuçların incelenebilmesi için oluşturulan düzlemlerin görünümü.....	60
8.6	Metan çalışmasında CH_4 kütle oranı (düzlem A)	61
8.7	SG çalışmasında CH_4 kütle oranı (düzlem A)	61
8.8	CH_4 kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)	61
8.9	CH_4 kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)	62
8.10	Metan çalışmasında CO kütle oranı (düzlem A)	62
8.11	SG çalışmasında CO kütle oranı (düzlem A)	63
8.12	CO kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)	63
8.13	CO kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)	64
8.14	Metan çalışmasında CO_2 kütle oranı (düzlem A)	64
8.15	SG çalışmasında CO_2 kütle oranı (düzlem A)	65
8.16	CO_2 kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)	65
8.17	CO_2 kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)	66
8.18	Metan çalışmasında ortalama kesir görünümü (düzlem A)	66
8.19	SG çalışmasında ortalama kesir görünümü (düzlem A)	66
8.20	Metan çalışmasında ortalama kesir değişkeni (düzlem A)	67
8.21	SG çalışmasında ortalama kesir değişkeni (düzlem A)	67
8.22	Metan çalışmasında skalar kayıp oranı (düzlem A)	68
8.23	SG çalışmasında skalar kayıp oranı (düzlem A)	68
8.24	Metan çalışmasında sıcaklık dağılımı (düzlem A)	69
8.25	SG çalışmasında sıcaklık dağılımı (düzlem A)	69
8.26	Sıcaklık dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)	69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
8.27	Sıcaklık dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)	70
8.28	Sıcaklık dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem D)	70
8.29	Metan çalışmasında hız dağılımı (düzlem A)	71
8.30	SG çalışmasında hız dağılımı (düzlem A)	71
8.31	Hız dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)	71
8.32	Hız dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)	72
8.33	Hız dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem D)	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Doğalgaz bileşenleri	10
6.1	BPR ısı ve çevresel performans	31
6.2	Değişik MGT yüklemelerinde doğal gazın yanma sınır koşulları	35
6.3	Sentetik gazın tam yüklemde (80kW) yanma sınır koşulları	36
6.4	Jones ve Lindstedt mekanizması	39
6.5	Sentetik gaz bileşimi (hacimsel oran)	41
7.1	Birincil ve ikincil duvar şartlarındaki sıcaklık değerleri	54
8.1	MGT tam yükleme sırasında hesaplanmış çıkış konsantrasyonları.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
η_{turb}	Türbin verimi
η_{cycle}	Çevrim verimi
η_{rec}	Isı değiştirici etkinliği
η_{CC}	Yanma odası verimi
m_a	Hava debisi
H_u	Alt ısıı değer
Φ	Nominal karışım değeri
β	Kompresör basınç oranı
C_p	Özgöl ısı
ε	Rejeneratör etkinliği
k	Özgöl ısıların oranı
Kg	Kilogram
kW	Kilo watt
kWh	Kilo watt saat
MW	Mega watt
MWh	Mega watt saat
m	Metre
\dot{m}	Kütlesel debi
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
N	Newton
P	Basınç
r_c	Yarıçap
D	Çap
π	Pi sayısı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
L_C	Çember çevresi

A	Kesit alanı
N_{delik}	Delik sayısı
$S_{eşdeğer}$	Eşdeğer boşluk
s	Kalınlık
f	Karışım kesri
α	Hava/yakıt karışım oranı
χ	Skalar yayılım oranı

Kısaltmalar Açıklama

M.G.T.	Mikro gaz türbini
İ.Y.M.	İçten yanmalı motor
IPRP	Birleşik piroliz rejeneratör sistemi
Ar-Ge	Araştırma geliştirme
Y.O.	Yanma odası
HAD	Hesaplama akışkanlar dinamiği
BB	Birinci bölüm
İB	İkinci bölüm
ÜB	Üçüncü bölüm
OB	Orta bölüm
SB	Seyreltme bölümü
SG	Sentetik gaz
RANS	Reynolds-ortalama Navier-Stokes denklemleri
ED-FR	Eddy-Sonlu oranlar
LHV	Alt ısı değer

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Sera gazları emisyonunun azaltılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması gerekmektedir. Biyokütle ve atıklar, diğer yenilenebilir kaynaklara göre mevsimsel değişimlere bağlı olmaksızın sürekli bir biçimde elde edilebilir. Buhar güç çevrimi ve biyokütlenin akışkan yataklı yanması ile atıklardan elektrik enerjisi üretimi sağlanabilir. Biyokütle, yüksek ulaşım masraflarının olduğu geniş bir sahada bulunur. Büyük ölçekli türbin kullanımı bu alanlarda zor olmaktadır. Bununla birlikte küçük veya mikro türbin dönüşümü, biyokütlenin yeterli olduğu kırsal alanlarda merkezi dağıtmayı mümkün kılabilir ve ulaşım giderlerini azaltabilir. Yakıt olarak gaz veya sıvı kullanan içten yanmalı motorlar (İYM) ve mikro gaz türbinleri (MGT) düşük ölçekli elektrik üretimi yapabilmektedir, bu sebeple biyokütle ve atıklardan yararlanma işlemi gazlaştırma ve sıvılaştırma işlemine ihtiyaç duyar. Bu amaç doğrultusunda orijinal Entegre Piroлиз Rejeneratör Teçhizat (IPRP) teknolojisi Perugia Üniversitesinde dönel bir ısıl bozunum fırını ve gaz türbini birleştirilerek tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Bu teknoloji ticari olarak uygun olup 80kW elektrik üreten mikro-gaz türbininde kullanılan deney düzeneğinde kurulmuş aynı zamanda biyokütle piroliz işlemi için de adapte edilmiştir. Gaz türbinlerinde biyokütleden elde edilen sentetik gaz kullanımı, düşük ısıl değeri, değişken yanma hızı, akışa karşı temizleme sırasında katran, metal izleri, parçacıklar gibi gaz kirleticileri ortadan kaldırma başarısızlığı, zayıf emisyon kontrolünden dolayı hala araştırma geliştirme (Ar-Ge) konusu iken, metan ve propan gibi sadece temiz ve yüksek enerji içerikli gazların kullanımı için kanıtlanmış ve güvenilirdir. Ayrıca bu konularda literatür oldukça zayıftır. Genellikle küçük ölçekli gaz türbinlerine göre mimari ve çalışma prensibi açısından çok farklı olan orta veya büyük ölçekli güç üniteleri için literatür araştırması bulmak mümkündür. Özellikle MGT son zamanlarda ilginç market pazarlarını meşgul etmektedir.

Perugia, Bologna, Ferrara ve Trieste Üniversitelerinden oluşan bir İtalyan araştırma grubu, nümerik ve deneysel çalışmalar vasıtası ile biyokütleden ve atıklardan elde edilen sentetik gazın MGT'de kullanımı sırasında engel oluşturan teknik bariyerleri

gözlemlemeyi amaçlamaktadır. Perugia üniversitesinde test çalışmalarının yapıldığı ticari olarak uygun olan mikro-türbinin bulunduğu IPRP teknolojisinde ormansal biyokütleden dönel bir fırın içinde üretilen sentetik gaz kullanılmakta ve su verme-temizleme bölümünde temizlenmektedir. Bu çalışmanın üstünde durduğu araştırma sınırları, MGT’de kullanılacak sentetik gazın yanma etkinliği açısından yanmasının ve emisyon kontrolünün optimizasyonu olarak nitelendirilebilir. Karışık parçaların tasarımı tam bir parametrik yaklaşım olarak algılanırken, yanma odasının (YO) analizi için gömleğin iç ve dış bölümlerinin içindeki reaktif veya reaktif olmayan akış ve açık alev yanması iyi bir bilgi birikimine gereksinim duymaktadır. Sonuç olarak, yanma odasının tasarımı için deneysel bir doğrulama gereklidir çünkü bazı tasarım kriterleri hala ampiriktir. Bu amaçla doğal gazın yanması için nümerik bir çalışma IPRP teknolojisinde kullanılan mikro türbin gaz sisteminde farklı ağ yapısı, model ve mimari yapıların karşılaştırılması, ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımında gerçekleştirilmiştir. Diğer bir adım, üretilen sentetik gaz karşımı temel alınarak normal durumdan farklılıkları ve gerekli düzeltmeler tartışılmış ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Doğal gaz ve sentetik gaz için gerçekleştirilen simülasyonların sonuçları, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Detaylı madde yapısı, HAD çalışmasında termal akış alanı ve kirletici ürünleri önceden tahmin edilebilmesi için Fluent programında analiz edilmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

Sentetik gaz kullanılarak çalıştırılan basınçlandırılmış mikro türbinin yanma odasında ön karışımli bir yanmanın deneysel sonuçları değerlendirilmiştir. Otomatik ateşleme, dinamik ve statik dengesizlik problemleri gözlemlenmemiştir. Sıcaklık profili, normal limitlerin içinde kalmış ve alev tespit yerlerinde önemli bir değişim göstermemiştir (Delattin, et al., 2009)

Biyokütle gazlaştırma prosesi uygulamalarda ısı ve güç üretim amaçlı olarak mikro türbin sistemine entegre edilmiştir. Muhtemel en yüksek verimliliğe ulaşabilmek için birleşik ısı ve güç sistemlerinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Problemler tespit edilip optimize işlmeleri tartışılmıştır (Karakas, et al., 2006).

Isıl değiştircili seramik bir mikro türbin incelenmiştir. Bu mikro türbin 7.5 kW enerji sağlamaktadır, yanma odası ve ısı değiştirci seramikten yapılmıştır. Bu alışma, geliştirilen mikro türbinin bir evin genel enerji ihtiyacını sağlayacak uygulanabilir bir ürün olarak kullanılmasını amaçlamaktadır (McDonald, et al., 2007)

Yanma ve kirletici gaz türbininin yanma odasında Eulerian flamelet modeli çalışılarak bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Kerosene kimyasal özelliklerini modellemek için detaylı reaksiyon mekanizması kullanılmıştır. Modelin kirletici gazları üzerindeki ve oluşturulan alev sayısının etkisi araştırılmıştır (Riesmeier, et al., 2004)

Fluent programında kullanılacak yanma modeli için bir yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Bu alışma karışık geometri, fizik ve kimyasal modelleme için anlaşılır gaz türbin yanma modeli metodolojisi içermektedir. Türbülans alt modellerinin, yakıt enjekte edilmesi ve türbülans-kimyasal etkileşimi incelenmiştir (Mongia, et al., 2007)

BÖLÜM 2

BIYOKÜTLE VE DOĞAL GAZ

2.1. Biyokütle

Bitkilerin ve canlı organizmaların kökeni olarak ortaya çıkan biyokütle, genelde güneş enerjisinin fotosentez yardımıyla depolayan bitkisel organizmalar olarak adlandırılır. Biyokütle, bir türe ve ya çeşitli türlerden oluşan bir topluma ait yaşayan organizmaların belirli bir zamanda sahip olduğu toplam kütle olarak da tanımlana bilir. Bitkilerin fotosentezi sırasında kimyasal olarak özellikle selüloz şeklinde depo edilen ve daha sonra çeşitli şekillerde kullanılabilen bu enerjinin kaynağı güneştir. Güneş enerjisinin biyokütle biçimindeki depolanmış enerjiye dönüşümü, insan yaşamı için esastır. Canlı organizmaların fotosentez sonucu oluşması ve bütün yaşamın güneş enerjisinin depo edildiği oksijene bağlı olması yenilenebilir enerji oluşturan fotosentez olayının önemini açıkça göstermektedir. Fotosentez yoluyla enerji kaynağı olan organik maddeler sentezlenirken tüm canlıların solunumu için gerekli olan oksijeni de atmosfere verir. Üretilen organik maddelerin yakılması sonucu ortaya çıkan karbondioksit ise, daha önce bu maddelerin oluşması sırasında atmosferden alınmış olduğundan, biyokütleden enerji elde edilmesi sırasında çevre, CO_2 salımı açısından korunmuş olacaktır. Görüldüğü gibi bitkiler yalnız besin kaynağı değil, aynı zamanda çevre dostu tükenmez enerji kaynaklarıdır.

Biyokütleyle örnek olarak, ağaçlar, mısır, buğday gibi özel olarak yetiştirilen bitkileri otları, yosunları, denizdeki algleri, evlerden atılan meyve ve sebze artığı gibi tüm organik çöpler, hayvan dışkılarını, gübre ve sanayi atıklarını saymak olanaklıdır. Biyokütle, tükenmez bir kaynak olması her yerde yetiştirilebilmesi, özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomi gelişmelere yardımcı olması nedeniyle uygun ve önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Petrol, kömür, doğal gaz gibi tükenmekte olan enerji kaynaklarının kısıtlı olması, ayrıca bunların çevre kirliliği oluşturması nedeni ile biyokütle kullanımı enerji sorununu çözmek için giderek önem kazanmaktadır.

Kömür, petrol ve doğal gaz gibi yakıtlarda, yine canlı varlıkların milyonlarca yıl yer altında kalması ile oluşan fosil biyokütle olarak anılabilirler. Bitkilerin toprak altında milyonlarca yıl kalmasıyla oluşan fosil yakıtlar, aslında yukarıda tanımlanan biyokütle ile aynı özellikleri taşımalarına karşın yer altındaki sıcaklık ve basınçla değişime uğradıklarından, yakıldıklarında havaya birçok zararlı madde atarlar. Ayrıca, milyonlarca yılda oluşan bu birikimin kısa süre içinde yakılması havadaki karbon dioksit dengesinin bozulmasına yol açmış, bunun sonucu olarak da küresel ısınma başlamıştır. Fosil yakıtların diğer zararları arasında asit yağmurları ile ormanların yanı sıra canlı varlıkların ve hatta binaların dış yüzeylerinin bozulmasını sayabiliriz.

2.2. Biyokütle Çevrim Teknolojisi

Biyokütleden enerji yanında, mobilya, kâğıt, yalıtım maddesi yapımı gibi daha birçok alanda yararlanılmaktadır. Enerji olarak kullanılmasında ise, katı, sıvı ve gaz yakıtlar elde etmek için çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Biyoetanol, biyogaz, biyodizel gibi yakıtların yanı sıra, yine biyokütleden elde edilen, gübre, hidrojen, metan ve odun briketi gibi daha birçok yakıt türü saymak olanaklıdır. Bu yakıtların elde edilmesinde termokimyasal ve biyokimyasal olarak sınıflanabilen yeni teknikler geliştirilmiş ve yıllar içinde verimlilikleri artırılmıştır. Önümüzdeki yıllarda bu teknolojilerde yeni gelişmelerin yanında, yalnız biyokütle kaynağıyla çalışan büyük termik santrallerin yapımı planlanmaktadır. İsveç ve Finlandiya gibi ülkelerde bölgesel biyokütle santralleri ile elektrik üretimi yapılmakta olup yeni santrallerin yapımı sürmektedir.

2.2.1. Doğrudan yakma

Biyokütlenin doğrudan yakılarak enerji üretilmesi, bilinen en eski yöntem olmasına karşın, son yıllarda verimi yükseltmek için yeni yakma sistemleri geliştirilmektedir. Özellikle biyokütle ile çalışan termik santral yapımında akışkan yataklı sistemler alışıl gelmiş yakma sistemlerinin yerlerini almaktadır. Hemen her türlü biyokütle kaynağını doğrudan yakmak olanaklıdır. Ancak, nem oranı yükseldikçe elde edilen ısı değer azdır. Yanma, biyokütle içindeki yanabilir maddelerin hidrojenle hızlı kimyasal tepkimesi olarak tanımlanır. Örneğin mısır, ayçiçeği sapları gibi tarım

atıkları içindeki yanabilir maddeler, karbon, hidrojen ve potasyum gibi bazı metalik elementlerdir. Bu kimyasal tepkime sonucu ortaya çıkan atık maddeler ise, karbondioksit, su buharı ve bazı metal oksitlerdir. Bu ısıveren bir tepkime olup, yakılan kilogram bazına yaklaşık 7800, hidrojen ise, 3500 kilokalori ısı açığa çıkar.

2.2.2. Havasız Çürütme

Havasız çürütme biyolojik bir işlem olup, oksijensiz ortamda yaşayabilen mikroorganizmalar tarafından yapılan ve organik madde + bakteri + su = metan + karbondioksit + hidrojen sülfür + kararlı gübre+ bakteri olarak ifade edilir. Bu işlem ancak tümüyle oksijensiz bir ortamda gerçekleşebilir. Böyle bir ortamda işlemi yürüten iki tip bakteriden mezofilik bakteriler 35°C, termofilik olanlar ise 54°C dolayında bir sıcaklıkta üretim yaparlar. Termofilik bakteriler, mezofilik olanlara oranla daha yüksek hızda metan üretirler. Ancak sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkilenirler.

2.2.3. Fermantasyon

Biyokütlede, bilindiği üzere değişik oranlarda, hemiselüloz ve lignin bulunmaktadır. Selüloz enzimatik hidrolizin arkasından uygulanan, kimyasal hidroliz, enzimler veya kimyasal işlemler ile glikozla parçalanabilir. Kimyasal hidroliz şartları bazen glikozu bozabildiği için, bu işlem son derece dikkatle yapılması gerekmektedir. Glikozun fermantasyonu ile etanol, aseton, bütanol ve ham petrol ürünlerinden elde edilen ürünlere eş değer birçok kimyasal ürün elde edilebilir. Bu kimyasal ürünler, petrolden çıkarılan kimyasal ürünler yerine kullanılabilir. Diğer bir deyişle, selüloz, glikoz ve diğer birçok ürün için ucuz bir biyokütle kaynağıdır.

2.2.4. Piroliz

Piroliz, biyokütleden gaz elde etmek için kullanılan en eski ve basit bir yöntem olup, oksijensiz ortamda odunun 900°C ye kadar ısıtılması ile oluşan kimyasal ve fiziksel olaylar dizisi olarak tanımlanır. Piroliz sonucu, gazlar, katran, organik bileşikler, su ve odun kömürü gibi maddeler elde edilir. Isıl değerleri yüksek metan ve hidrojen, elde edilen gazlar arasında yer alırken, oluşan organik maddelerle petrolden

çıkarılanlara benzer olarak petrokimyasal adı verilir. Biyokütleyi çeşitli yakıtlara çevirmek için kullanılan en iyi yöntemlerden biridir.

2.2.5. Gazlaştırma

Gazlaştırma, karbon içeren biyokütle gibi katıların yüksek sıcaklıkta bozunması ile yanabilir gaz elde etme işlemidir. Bu işlem sırasında denetimli bir şekilde yakıt hücresine verilen hava ile biyokütle yakılır ve çıkan ürünler arasında hidrojen, metan gibi yanabilir gazların yanı sıra karbon monoksit, karbondioksit ve azot gibi gazlar da bulunur.

Biyokütle gazlaştırmasının çevreye ciddi bir zararı yoktur. Biyokütle içindeki kükürt miktarı göz ardı edilebilecek kadar azdır. Ancak, bu ürün kullanılmadan önce öğütülüp küçük parçacıklara ayrıldığında, akışkan yataklı sistemi içinde kullanılmaktadır. Kum ve yatağa beslenecek öğütülmüş biyokütle karışımı yanma odası içine yukarı doğru verilen hava akımı ile itilir. Hava akımı bu karışımı kolaylıkla hareket eden bir akışkan olacak şekilde ayarlar. Biyokütle parçalarının bir kısmının yakılması ile kumun homojen bir şekilde 650°C ile 850°C arasında ısınması sağlanır. Bu kimyasal tepkime sonucu oluşan gaz yukarı doğru çıkarken, siklon ayırıştırıcı içinden geçirilerek istenmeyen parçacıklar, katran ve diğer zararlı maddeler elenir. Elde edilen ürüne odun gazı, gen gaz veya jeneratör gazı adı verilir. Bu gazın birim hacmindeki ısı değeri 4 ile 11 MJ/m³ (10002600 Kcal/m³) arasında değişmekte olup, doğal gaza göre daha az enerji verirler.

2.2.6. Biyofotoliz

Biyofotoliz, bazı mikroskobik alglerden güneş enerjisi yardımıyla hidrojen ve oksijen elde edilme işlemidir. Deniz suyu içindeki bu algler bir tür güneş pili gibi çalışarak deniz suyunu fotosentetik olarak ayırıştırılmaktadır. Önümüzdeki yirmi yıl içinde hidrojen enerjisi teknolojisini kullanmayı planlayan Japonya da bu konu üzerinde yoğun araştırma yapılmaktadır.

2.3. Doğal Gaz

Doğal gaz günümüzden milyonlarca yıl önce dünyada yaşayan canlı artıkların yer katmanları arasında, basınç ve sıcaklık altında dönüşüme uğramasıyla ortaya çıkmaktadır. İçerisinde büyük oranda (%70-95) Metan (CH_4), daha az oranda Etan (C_2H_6), Propan (C_3H_8), Bütan (C_4H_{10}), Azot (N_2), Karbondioksit (CO_2), Hidrojen Sülfür (H_2S), Helyum (He) içeren renksiz, kokusuz, yüksek enerjili bir gaz yakıttır. Yapılan sondaj çalışmaları ile yeryüzüne çıkarılan doğal gaz, içindeki yabancı maddelerden temizlenmek için arıtma işlemine tabi tutulur.

Doğal gaz'ın bünyesinde kükürdün az miktarda oluşu diğer yakıtlara göre avantaj olarak ortaya çıkar. Bu durum doğal gaz kullanımında korozyon sorununu da ortadan kaldırmaktadır. Diğer bir yandan bünyesinde karbon miktarının az olması nedeniyle radyasyon yoluyla olan ısı transferini azaltır. Doğal gazda bulunan Azot, Oksijen ile reaksiyona girdiğinde yüksek sıcaklıklarda Azotoksitler (NO_x) oluşturmaktadır. Bu azotoksitler korozyona neden olmaktadır.

Doğal gazın yoğunluğu 0.6-0.8 kg/m³ arasındadır. Havaya göre daha hafif bir gaz olduğu için açık havada uçucu özelliği vardır. Ancak, kapalı yerlerde hava içindeki gaz oranı %5-15 arasında bulunduğunda patlayıcı özelliği vardır. Bu karışım oranları arasında herhangi bir alev ile temas ederse patlama ortaya çıkar. Doğal gaz çok düşük sıcaklıklarda (-160°C) atmosfer basıncında sıvılaşır. Basınç altında ise 47 barda - 82°C'de sıvılaştırılabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda sıvılaştırılmayan doğal gaz ortam sıcaklığında gaz durumundadır.

Doğal gaz sanayide, birçok sektörde tercih edilme nedenlerinin başında, doğalgazla yanmanın daha kolay kontrol edilebilmesi, yakıt miktarının ayarlama sağladığı kolaylık ve çevre kirliliğini önleyici özellikleri ile dağıtımın borularda kullanım yerine kadar yapılmasından dolayı depolama ihtiyacının olmaması gelmektedir. Sanayide doğal gaz buhar üretiminde, proses enerjisi elde etmede, mekan ısıtmada, elektrik üretiminde kullanıldığı gibi, içerdiği hidrokarbonlar nedeniyle amonyak, metanol, hidrojen ve petrokimya ürünleri sentezinde ana girdi olarak

kullanılabilmektedir. Bunların yanında; çimento, metal, kâğıt, cam, seramik sektörleri ile seralar doğal gazın yaygın olarak kullanıldığı sektörlerdir.

2.4. Yanma

Yanma, bir maddenin, tutuşma sıcaklığında havanın oksijeni ile reaksiyonu olarak tanımlanabilir. Isı ve sıcaklık kavramlarının bilinmesi gerekmektedir. Isı, yüksek sıcaklıklı ortamdan düşük sıcaklıklı ortama enerji aktarımı olup, bir enerji kavramıdır. Sıcaklık ise ortamdaki moleküllerin ortalama kinetik enerjileri ile orantılı olan bir kavramdır. Maddenin moleküler yapısında elektronlar düzeyindeki değişikliklere kimyasal reaksiyon adı verilmektedir. Reaksiyona girenlere reaktant, reaksiyondan çıkanlara ise ürün adı verilir. C, H, S gibi yanıcı elemanların yanması için gerekli minimum oksijen miktarına, teorik oksijen miktarı, buna karşılık gelen havaya teorik hava miktarı denir. Yanma olayında her yanıcı molekülün, yakıcı molekülle birleşme şansı olmadığı için, tam yanma elde edebilmek için, yanma için gerekli teorik hava miktarından daha fazla hava verilir. Fazla verilen bu hava miktarı, hava fazlalık katsayısı (λ) ile belirlenmektedir.

Bir yakıtın birim miktarının yandığı zaman verdiği ısı miktarına yakıtın ısıl değeri denir. Bu değer sıvı ve katı yakıtlarda kJ/kg(kcal/kg), gaz yakıtlarda kJ/Nm³ olarak verilmektedir. Yakıtın ısıl değeri üst ısıl değer ve alt ısıl değer olmak üzere iki kavramla anılmaktadır. Üst ısıl değer, yanma ürünlerindeki suyun sıvı halde bulunduğu zamandaki değerini verir. Bu durumda yanma sırasında buhar haline gelen su yoğunlaşırken bu ısını geri vererek artı bir ısıl değer ortaya çıkarmaktadır. Alt ısıl değer ise yanma sonucu ürünlerde suyun gaz halinde olduğu zamanki enerjisi söz konusudur.

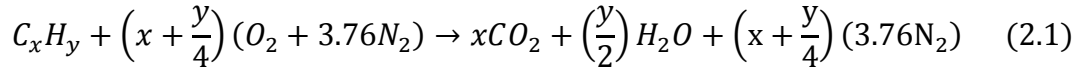
2.5. Yanma Hesabı

Tablo 2.1'de doğal gazın özellikleri verilmiştir. Bu özelliklere uygun olarak yanma hesabı yapılmıştır.

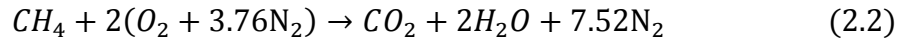
Tablo 2.1. Doğalgaz bileşenleri (Karakoç, 2006)

Bileşen	Mol Kesri	% Dağılımı
Metan	%85	%81.25
Etan	%9	%8.60
Propan	%1.8	%1.72
Bütan	%1.7	%1.63
Pentan	%0.8	%0.76
Hidrojen	%0	%0
Kükürt	%0	%0
Oksijen	%0.42	%0.40
Karbondioksit	%1.5	%1.43
Azot	%4.38	%4.21
TOPLAM	104.60	100

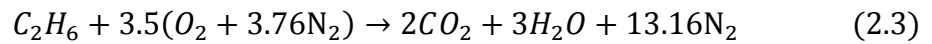
Hidrokarbonların tam yanması halinde denklem şu şekilde yazılabilir;



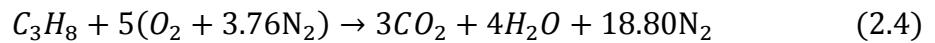
Metan için;



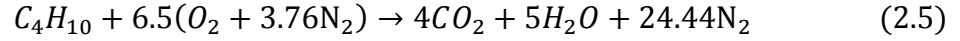
Etan için;



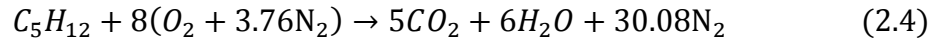
Propan için;



Bütan için;

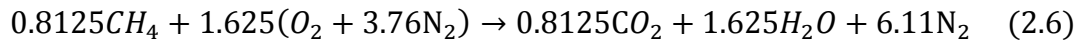


Pentan için;

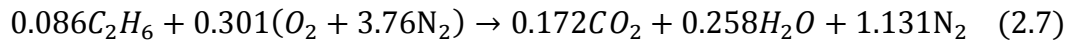


Doğal gaz bileşenlerinin yüzde dağılımlarına göre tepkimeleri yeniden düzenlenirse;

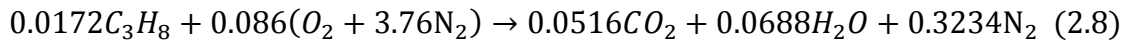
%81.25 Metan için;



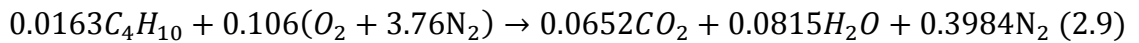
%8.60 Etan için;



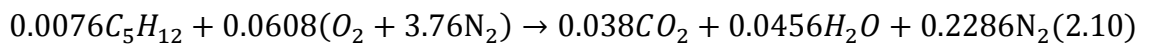
%1.72 Propan için;



%1.63 Bütan için;



%0.76 Pentan için;



Gerekli O_2 miktarı Denklem (2.11) gibi hesaplanabilir;

$$\left[\begin{array}{l} \text{Bileşiklerin yanması} \\ \text{için gerekli } O_2 \text{ miktarı} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Yakıt içindeki } O_2 \\ \text{miktarı} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Gerekli} \\ O_2 \text{ miktarı} \end{array} \right] \quad (2.11)$$

$$1.625 + 0.301 + 0.086 + 0.106 + 0.0608 - 0.004 = 2.175 \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (2.12)$$

O_2 miktarından hareketle ve birim havadaki O_2 miktarı hesaba katılarak aşağıdaki teorik yanma havası değerine ulaşılabilir;

$$\text{Teorik yanma havası} = v_{h_0} = \frac{100}{21} [2.175] = 10.372 \frac{Nm^3}{Nm^3} \quad (2.13)$$

Teorik yanma hava katsayısı fazlalık katsayısı ile çarpılarak gerçek hava miktarı bulunabilmektedir. Doğal gaza ait alt ısıl değer bileşenlerin ısıl değerleri yardımıyla bulunur;

$$\begin{aligned} H_u &= (0.8125 \times 8560) + (0.086 \times 1537) + (0.0172 \times 21800) + (0.0163 \times 28354) \\ &+ (0.0076 \times 34899) = 9331 \frac{kcal}{Nm^3} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Araştırmada kullanılacak metan gazının alt ısıl değeri olarak ($H_u = 11946 kcal/kg = 50000 kJ/kg$) olarak saptanmıştır (Karakoç T.H.,2006). Elde edilen sentetik gaz için alt ısıl değer hesabı Bölüm 7'de yapılmıştır.

BÖLÜM 3

HAD TARİHSEL GELİŞİMİ VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

3.1. Giriş

Nümerik akış mekaniği (hesaplamalı akışkanlar dinamiği-HAD) artan bir şekilde teknik problemlerin çözümü, ısı transfer ve hatta kimyasal reaksiyonlar için kullanılmaktadır. Bu teknik oldukça kuvvetli ve endüstriyel ve endüstriyel olmayan geniş bir uygulama alanına yayılmaktadır. Bunlara örnek olarak:

- Uçak ve taşıtların aerodinamiği: yükselme ve sürüklenme
- Gemilerin hidrodinamiği
- Güç üniteleri: gaz türbinlerinde ve içten yanmalı motorlardaki yanma
- Turbo çark: döner parçalar da iç akış, difüzör vb.
- Elektrik ve elektronik mühendisliği: mikro devrelerin donanımını soğutma
- Kimyasal süreç mühendisliği: karıştırma ve ayrıştırma, polimer kalıplama
- Binaların iç ve dış çevresi: ısıtma/soğutma
- Denizcilik mühendisliği: açık deniz yapılarında yükleme
- Çevre mühendisliği: kirletici ve artık madde dağılımı
- Su ve deniz bilimi: okyanus, akarsu, nehir ağzında akış
- Meteoroloji: hava tahmini
- Biyomedikal mühendisliği: kan akışı

1940'lerden beri, çoğu akışkanlar dinamiği problemine analitik çözümler, özellikle aerodinamik konusunda artan çözümler, basit veya ideal olan durumlar için rahatlıkla bulunabilmekteydi. Endüstrinin artan ihtiyacı ile doğru orantılı olarak büyük bir orandaki problemin çözülemediğinin farkına varılmıştır. Bu yarı-analitik/asimtotik cesaretlendirici bir başlangıç olmuştur. Bu metotlar viskoz akış problemleri, yapışkan sıkıştırılabilir akışta bulunan ölçü benzerlik analizi ve karışıklık yaratan teknikleri içerir (Versteeg and Malalasekera,1995). 1980'lerin ortasında, Navier-Stokes tarafından geliştirilen denklemler viskoz akışlarının daha zor simülasyonuna önemli ölçüde odaklanmaya başlamıştır. Bununla birlikte, çeşitli nümerik türbülans modelleri farklı

zorluk ve doğruluk derecelerinde geliştirildi. Önde gelen türbülans modelleri direk nümerik simülasyon ve geniş Eddy simulasyonu şeklinde sunuldu. Buna rağmen bu iki uygulamada hala kullanılan mühendislik uygulamalarının uzağında kalmaktaydı. Nümerik metodolojilerin ilerlemesi ile beraber, 1980'lerin sonunda gerçek gaz modellemesine ihtiyaç duyan akış problemlerinin çözümünde uygulanabilir hale geldi. İlk geniş ölçülü uygulamalar arasında, atmosfere dönen araçlarda 3-D hipersonik akış (Avrupa HERMES mekiği gibi), denge durumu ve dengede olmayan kimyasal modeller kullanarak hesaplandı. Çoğu araştırma uygulamalarında yanma nümerik simülasyonu ve özellikle alev modelleme üzerinde hala çalışılmaktadır. Bu çalışmalar düşük emisyon gelişmeleri gaz türbinleri ve motorlar için oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca buhar modelleme ve özellikle buhar yoğunlaştırma, etkili buhar türbin tasarımı için önemli bir anahtardır. Donanım programlayan ekonomik, yüksek performans kullanılabilirliği ve kullanıcı dostu bilgi ara yüzü son zamanlardaki kullanım ilgisini arttırmıştır ve HAD 1990'larda daha geniş endüstriyel topluluğa giriş yapmıştır (Blazek,2001).

Günümüzde HAD metodolojileri rutin olarak hava taşıtı alanında, turbo çarklarda, araba ve gemi tasarımında kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak HAD, meteoroloji, denizbilim, astrofizik ve hatta mimarlıkta uygulanmaktadır. HAD uygulamasının akış sistem tasarımına deneysel bazlı yaklaşım üzerinde birçok avantajı vardır:

- Yeni tasarım giderleri ve gecikme zamanı azalması
- Tecrübelerin kontrolünün zor olduğu veya uygulanmasının imkansız olduğu yerde çalışma sistemi yeterliliği
- Sistem çalışma sistemlerinin tehlikeli şartlar altında ve normal performans limitlerinin dışındaki durumlarda
- Uygulama da sonuçların detaylarının limitsiz seviyesi

Tecrübe ve işçi kiralama gücü giderleri HAD ile yapılan uygulamaların giderlerine göre çok daha fazladır ve bu uygulamaların ek masrafı olmaması avantaj sağlamaktadır.

3.2. Bir HAD Kodunun Çalışma Prensipleri

Had kodları akış problemlerinin üstesinden gelen nümerik algoritmalar çevresinde yapılandırılmıştır. Çözüm gücüne kolay ulaşım sağlayabilmek için ticari HAD paketleri gelişmiş kullanıcı ara yüzü içerir, böylelikle problem parametrelerinin girilmesi ve sonuçların incelenmesini mümkün kılar. Böylece bütün kodlar üç ana kısımdan oluşur: (i) bir ön işlemci, (ii) bir çözücü, (iii) bir son işlemci.

3.2.1. Ön işlemci

- Ön işlemci bir akış probleminin çözücü tarafından kullanımı için dost ara yüzü operatör ve sonradan bu girdinin uygun forma dönüşümü HAD programına girdisinden oluşur.
- İlgili bölgenin geometri tanımı.
- Hücre oluşturma alanının alt bölümlerinin birkaç küçük, üst üste binmeyen alt-alanlar; hücrelerin(kontrol hacmi veya element) kafesi (veya ağ).
- Model için gereken fiziksel ve kimyasal modelin seçimi
- Akış özelliğinin seçilmesi
- Birbiri ile çakışan veya dokunan alan-sınır hücrelerinde uygun sınır koşullarının seçimi

Akış problemine (hız, basınç, sıcaklık vb.) her hücre içindeki noktalarda tanımlanır. HAD çözüm doğruluğu kafesteki hücrelerin sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Genelde, fazla hücre sayısı daha fazla doğruluk anlamına gelir. Çözümün doğruluğu ve gerekli bilgisayar donanımı açısından ve hesaplama zamanı oluşturulan hücrelerin iyi olmasına bağlıdır. Optimal ağ oluşumu genelde uniform olmayan: geniş varyasyonların noktadan noktaya olduğu ince alanlarda ve nispeten az değişikliklerle daha iri alanlarda oluşur. Son olarak bu tarz programlar otomatik olarak hızlı varyasyon alanlarındaki kafesi düzenlerler.

3.2.2. Çözücü

Üç farklı nümerik çözüm tekniği vardır: sonlu fark, sonlu eleman, spektral yöntem. Sonlu eleman metodu akış probleminin bilinmeyenlerini ϕ , koordinat sisteminin kafesinin düğüm noktalarında nokta örnekleri aracılığı ile tanımlar. Kısaltılmış Taylor seri açılımı genellikle her kafes noktasında ϕ 'in örnek noktaları açısından ϕ 'in türevlerinin sonsuz fark yaklaşımlarının oluşturulması için kullanılır.

Sonlu eleman metotları bilinmeyen yerel akış ϕ 'in varyasyonlarını tanımlamak için elemanlarda geçerli parçalı fonksiyonlarını basit olarak kullanır. Eğer ϕ 'in için parçalı yaklaşım fonksiyonu denklem içinde yer değiştirilirse, kesinlikle devam etmez ve hatayı ölçmek için residual tanımlanır. Sonra hatalar, bazı algırlarla bir takım entegrasyon ve ağırlık fonksiyon ile çarpılarak minimuma indirilir. Sonuç olarak yaklaşım fonksiyonunun bilinmeyen katsayıları için bir takım cebirsel denklemler elde edilir. Sonlu eleman metodu başlangıç olarak yapısal stres analiz için geliştirilmiştir.

Spektral yöntem Hızlı Fourier Dönüşümü kullanımı içeren belli parçalı denklemlerin nümerik olarak çözümü için kullanılır. Uygulanabilir durumlarda, spektral yöntemi "üstel yakınsama" denilen hata özelliğine sahiptir. Periyodik geometri problemleri için Fourier seri metodu, sonlu ve bağımsız geometri problemleri için polinomal spektral metot, doğrusal olmayan büyük problemler için yalancı tayf metodu ve durgun şart problem sonuçlarının hızlı sonucu için spektral iterasyon yöntemi. Spektral yöntemi, çözümün alanı üzerinde genellikle sıfır olmayan sürekli fonksiyonların doğrusal birleşimi gibi çözüme yaklaşır. Bu konuda detaylı daha fazla bilgi Gottlieb ve Orszag(1997)'de bulunabilir. Sonlu hacim metodu esas olarak özel sonlu fark formülasyonu olarak geliştirilmiştir. Dört HAD kodu için esastır: Phoenics, Fluent, Flow3D and Star-Cd (Zingg,1999).

3.2.3. Son işlemci

Ön işlemcide olduğu gibi son zamanlarda çok fazla gelişme bu alanda yerini almış bulunmaktadır. Mühendislik çalışma alanlarında artan rağbetten dolayı, göze

çarpın grafik kabiliyetinin birçoğu, baştaki HAD paketleri çok yanlı görsel bilgi araçları ile donatılmıştır. Bunların içeriği:

- Ana geometri ve kafes görünümü
- Vektör çizimi
- Çizgi ve gölgeli şekil görünümleri
- 2d ve 3d yüzey görünümleri
- Molekül izleme
- Görüntü kullanma
- Renk postscript çıktısı

Yakın zamanda bu etkinliklere animasyon, dinamik sonuç göstergesi ve grafiğe ek olarak bütün kodlar güvenilir alfa nümerik çıktısı ve bilgi çıkış faaliyetleri eklenebilir (Versteeg and Malalasekera,1995).

BÖLÜM 4

MİKRO TÜRBİN

4.1. Giriş

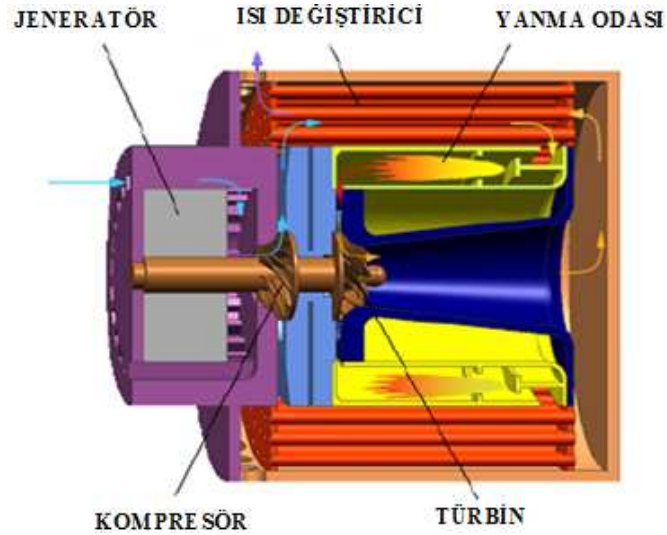
Günümüzde nano teknoloji, yapay zekâ uygulamaları yeni ürünlerin geliştirilmesinde öncülük etmektedir. Örneğin; taşınabilir bilgisayarlar, cep telefonları, kişisel dijital araçlar ve benzeri uygulamalar. Buna rağmen bu sistemlerin güç gereksinimi daha az ilgi görmüştür; örneğin bu cihazların güç gereksiniminde, geleneksel pil ve elektronik sistemler kullanılmaktadır. Bununla birlikte, çoğu yakıt türlerinin enerji yoğunluğu hala kullanılan pillerden 100 kat daha fazladır ve bu konu yakıt temelli mikro güç ünitelerinin kullanımına ilginin artmasına neden olmuştur. Bu tür güç sistemleri, yakıt hücreleri ve termoelektrik araçlarından yanma motorları ve gaz türbinlerine kadar olan geniş alandaki operasyon prensiplerini temel almaktadır. Yakıt hücrelerinden yüksek etkinlik göstermesi beklenirken, mikro gaz türbinlerinin yüksek güç yoğunluğu göstermesi beklenmektedir. Basıncılı hava ile çalıştırılan türbinin ilk modeli, hızın güç ve etkinliğini sınırlandırdığını göstermiştir. Gelecek adım, gaz türbininin geliştirilmesi kapsamında boyutlarının küçültülmesidir. Bu işlem zorluklar içermektedir. En büyük problemlerin başında, yüksek dönüş hızı (>5000,000 dev/dk), yüksek sıcaklık (>1200K) ve bileşenlerin verimi gelmektedir.

4.2. Mikro Gaz Türbini

Mikro türbin genel olarak tek-kademeli radyal bir kompresör ve türbin, yanma odası, bir ısı değiştirici ve mil yatağından oluşmaktadır. Şekil 4.1'de M-Dot havacılık tarafından İleri Koruma Araştırma Projeleri Ajansı için tasarladıkları bir mikro türbin gösterilmektedir.

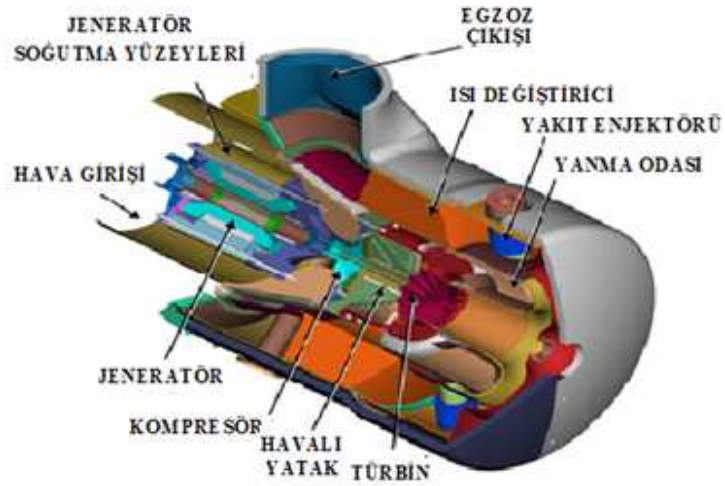
Mikro türbinler güç dağıtımı ve birleşik ısı ve güç uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların kullanımı bir kW'tan daha az üretim gereken elle kullanılan ünitelerden, onlarca veya yüzlerce kW üreten ticari-boyuttaki sistemlere kadar varmaktadır. Gaz türbinleri yüksek rotor dönüş hızında gaz sıcaklığını başarılı bir

biçimde yükseltebilmesi (askeri motor için 2100K'e kadar) açısından gelişmiş sistemler arasındadır.

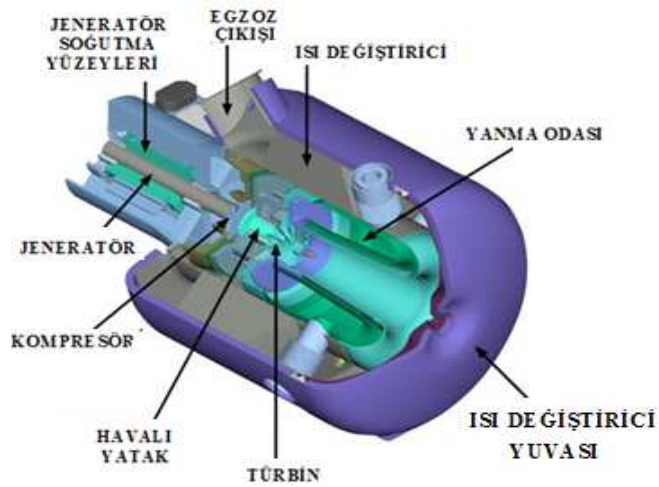


Şekil 4.1. Mikro türbin motorunun genel modeli (Powermems, 2009)

Sistem temel olarak kompresör, ısı değiştirici, yanma odası, türbin ve elektrik üreticiden oluşmaktadır. Mikro türbin, direk olarak tek turbo-kompresör şaftı ile çalıştırılan bir yüksek hız elektrik üretici veya bir dişli kutusu çalıştıran ayrı güç türbini yolu ile elektrik enerjisi üretir. Tek-mil tasarımının yüksek hız jeneratörü, daimi mıknatıs alternatörü kullanımı sağlar ve yüksek frekans alternatif akım çıktısına (30 kW mekanizma için yaklaşık 1600 Hz) ihtiyaç duyar, genel kullanım için 60 Hz dönüştürülür. Dönel kanatçık, skrol ve vidalı kompresörleri, mikro türbin tarafından gereken basınca gaz basıncını arttırmak için kullanılmıştır. Isı değiştiriciler, sıcak türbin egzoz gazının (tipik olarak 1200°F civarında) basınçlı havayı (tipik olarak 300°F - 400°F civarında) yanma odasına gitmeden önce ön ısıtmasını gerçekleştirdiği hava-gaz ısı değiştiricilerdir. Mikro türbinler sürekli görev hizmetinde rekabetçi olunması gereken verimlilik seviyesine ulaşabilmek için bir ısı değiştiriciye ihtiyaç duyar. Örnek olarak Capstone Türbin Firmasının ürettiği iki farklı çeşit mikro türbin Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 göstermektedir.



Şekil 4.2. Capstone C200 model mikro türbin (Capstone, 2009)



Şekil 4.3. Capstone C30 model mikro türbin (Capstone, 2009)

4.2.1. Termodinamik çevrim

Mikro türbinlerin ve gaz türbinlerinin termodinamik çevrimi aynıdır ve Brayton Çevrim prensibine dayanır. Bu çevrimde, atmosferik hava sıkıştırılır, sabit basınçta ısıtılır ve sonra genişir. Bu genişleme türbinde gerçekleştirilir ve iş elde edilir. Türbinden elde edilen işin bir kısmı ile kompresöre güç verilir.

Kapalı çevrimde (akışkanın atmosfere verilmediği durum), hava izentropik olarak sıkıştırılır, sabit basınçta yanma meydana gelir, genleşme türbinde izentropik olarak meydana gelerek başlangıç basıncına geri dönülür. Bütün motor çevrimlerinde, yüksek yanma sıcaklığı (genel endüstri kaynaklarında türbin giriş sıcaklığı) demek daha fazla verimlilik demektir. Sınırlayan faktör ise motorun yapıldığı çelik, seramik veya diğer materyallerin basınç ve sıcaklığa dayanımıdır(Soares,2007). Brayton çevrimi hakkında daha fazla bilgi Ek B’de verilmektedir.

4.2.2. Mikro türbinlerin avantajları ve dezavantajları

Düşük ölçekli güç üretim teknolojilerine kıyasla mikro türbinler birtakım avantajlar sunmaktadır. Örneğin, sivil mühendislik giderlerini azaltmak için güç üreten ünite başına kompakt boyut ve düşük ağırlık, az sayıda hareketli parçası, düşük ses seviyesi, çoklu yakıt kapasitesi, aynı derecede düşük emisyon fırsatı, yüksek dereceli atık ısı, düşük bakım giderleri, düşük titreşim seviyesi ve kısa dağıtım zamanı. Piston ve sürtünme yaratan parçaların olmamasından dolayı dengeleme problemleri ve yağlama yağı çok azdır. Düşük güç oranlarında piston motorları yüksek verimliliğe sahiptir fakat son zamanlarda yüksek verimli hava-motorlarından el edilen gaz türbin güç üniteleri ve endüstriyel gaz türbinlerinin özellikle birleşik güç ve ısı sistemlerinde kullanıldıklarında artan verimliliği bu motorlara meydan okumaktadır. Yakıt seçenekleri doğal gazdan başka dizel, atık gazları, endüstriyel atık gazlar, etanol ve diğer biyo-bazlı sıvı ve gazlardır.

Mikro türbin teknolojisinin teknik bakımından temel engel, düşük verimliliğe sahip olmaları olarak düşünülebilir. Ek olarak, gaz türbin etkinliği kısmi yüklemelerde azalmaktadır ve düşük ısı değerli yakıtların yanması türbinin türüne göre uygulanabilir olmamaktadır. Elektrik dağıtım sistemleri genel olarak küçük alanlarda fazlaca kurulmaya elverişli değil ve değiştirilmeye ihtiyaçları vardır, bu da hesaba katılmalıdır. Hatta mikro türbin donanımı, grid frekansında elektrik üretmek için güç iyileştirme gerektirir ve kurulum için ek bir masraf oluşturmaktadır.

Birleşik ısı ve güç sistemlerin kurulumu için teknik olmayan engeller ise; yatırım geri dönüş periyodu yüksek olması (altı yıla kadar), kafes birleştirme giderlerinin fazla olabilmesi, gerekli elektrik çevrimine ulaşım giderleri her zaman makul seviyede olmayışı olarak özetlenebilir. Aras, H. ve Ballı, Ö. mikro türbin ile birleşik ısı ve güç sistemlerinin enerji ve exerji analizini içeren kapsamlı bir çalışma yapmıştır.

4.3. Mikro Türbin Market Sahası

Endüstri, ticari ve yerleşim sektörlerinde güç üretimi için mikro türbinler kullanılabilir fakat bunların market potansiyelinde belirsizlikler vardır. Sürekli güç üretimi, yoğun tüketim saatlerinde yapılan takviye sağlama amaçlı gaz uygulamaları, mekanik ve atıklar ve biyoyakıtlar, birleşik ısı güç sistemleri, uzaktan güç, acil destek sistemlerinde kullanılabilir. Mikro türbinler için kimyasal, yiyecek ve içecek, kâğıt hamuru, kâğıt ve tekstil içeren endüstriler yüksek market potansiyeli oluşturmaktadır. Uzaktan güç uygulamaları yağ, gaz, madencilik kazıları operasyonlarında kullanılır. Biyokütle ve atıkların yandığı biyokütle marketleri, atık veya kâğıt hamuru ve yiyecek süreci gibi katı, sıvı veya gaz yakıt üretim endüstrilerinde bulunabilir.

Mikro türbin kullanımı birleşik ısı ve güç sistemlerinde geniş bir alanda görülür. Gaz türbininden ısı egzozu yüksek kalite, yüksek sıcaklıktadır ve ısı üretiminde, alan ısıtılmasında kullanılır. Mikro türbinler de yüksek verimliliğe ulaşabilmek için, egzoz gazı elektrik verimini arttırmak için ısı değiştiriciden geçirilir. Birleşik ısı ve güç uygulamalarında, gaz türbin sistemi %80 en kapsamlı verimliliğine ulaşmaktadır. Mikro türbin ve diğer enerji dağıtım kaynakları güç marketlerinde rekabet içinde olmasına rağmen, elektrik üretim fiyatı gelecekte daha cazip olması gerekmektedir. Fakat başka market potansiyel gelişim engelleri de bulunmaktadır.

Mikro türbinler sadece daha ucuz yakıt tüketen merkezi güç sistemleri ve yüksek verimliliğe sahip sistemlerle değil, ayrıca geniş-ölçülü birleşik gaz sistemleri ve hatta birleşik ısı ve güç marketlerinde sunulan bu sektöre birincil yön veren diğer gaz sistemleri ile rekabet etmektedir. Enerji giderinin son zamanlardaki değeri, doğal gaz fiyatındaki artış ve elektrik fiyatındaki düşüş, rekabetçiliği arttırmıştır (Pilavachi,2000).

BÖLÜM 5

YANMA ODASI

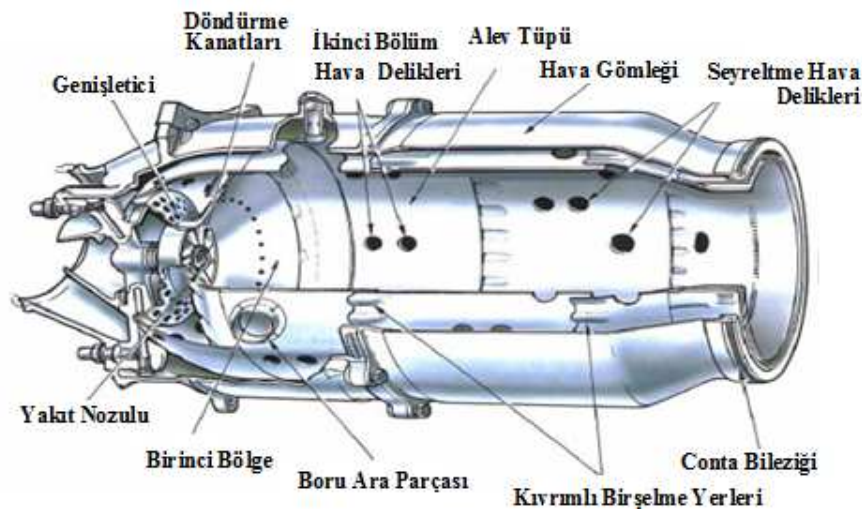
5.1. Giriş

Yanma odası, besleme nozulu tarafından sağlanan yakıtın kompresörden gelen hava ile karışarak yanma sonrası ısı yayılımı ile türbine mümkün olduğu kadar uniform sıcaklıkta gaz akışının elde edildiği motor parçasıdır. Enerjinin oluşumu hava ve yakıtın karışarak tutuşturulduğu yanma odasında gerçekleşir. Yanma sıcaklığı, gazın hızı ve hacmi artar. Bu akış nozuldan türbin kanatlarına doğru yönlendirilir, türbini döndürür ve kompresöre güç sağlar. Enerji çıkışı, mil gücü sıkıştırılmış hava ve basınç formunda elde edilir, hava taşıtı, trenler, gemiler, jeneratörler ve hatta tanklarda kullanılır.

5.2. Yanma Odası Çeşitleri

5.2.1. Boru şeklinde yanma odası

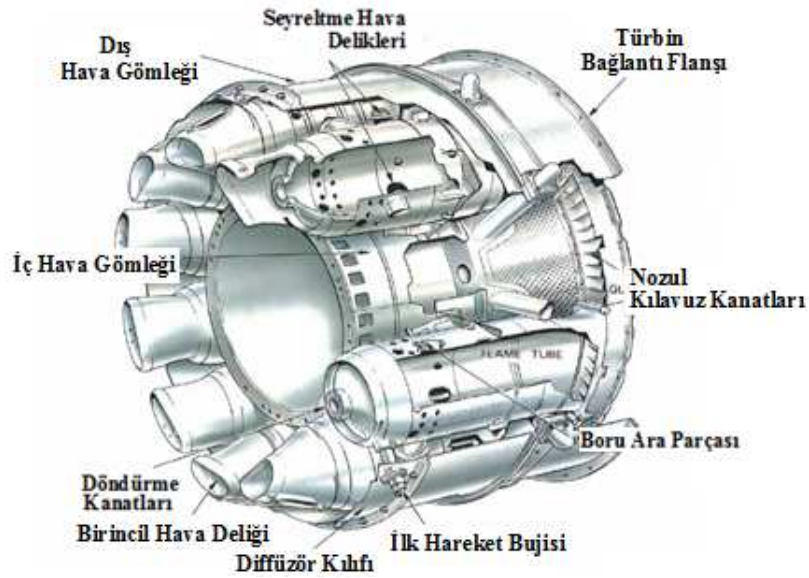
Bu tipte bazı alev boruları motor merkez çizgisi etrafına yerleştirilmiştir. Her bir alev borusunu bir dış bölüm kapsamaktadır. Birkaç alev borusu ara bağlantı oluşturmaktadır böylece aynı basınçta çalışabilir.



Şekil 5.1. Boru şeklinde yanma odası

5.2.2. Boru-dairesel yanma odası

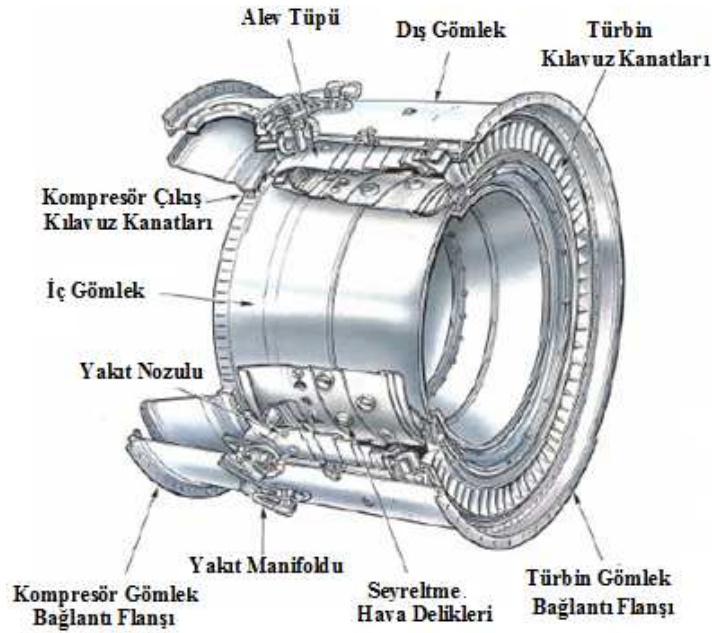
Tek bir gövdeye yerleştirilmiş birkaç alev borusundan oluşmaktadır. Hava akışı boru şeklindeki yanma odası ile aynıdır. Bu düzenleme dairesel yanma odasının kompaktlığı ile boru şeklindeki yanma odasının bakım kolaylığını birleştirerek bir avantaja çevirmektedir (Şekil 5.2.)



Şekil 5.2. Boru-dairesel biçimli yanma odası

5.2.3. Dairesel yanma odası

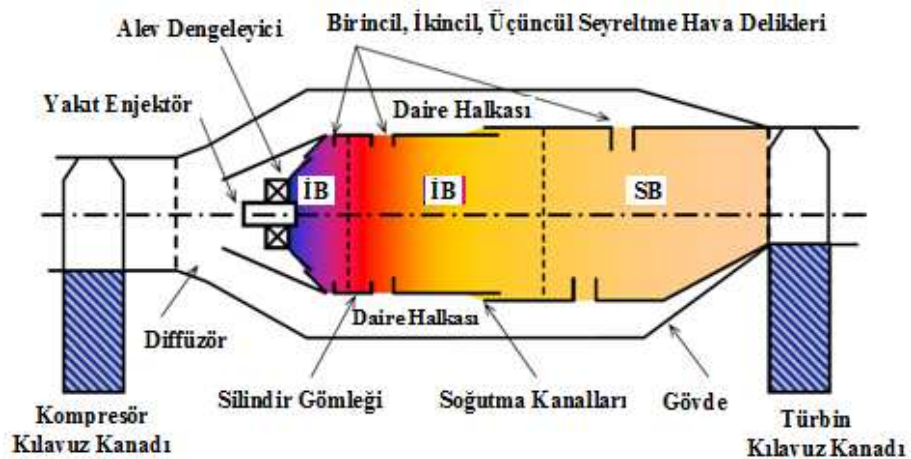
Bu tip yanma odası dairesel şekildeki iç ve dış boru kılıftan oluşan tek bir alev borusundan meydana gelmektedir. Temel avantajı ise, aynı performansta fark edilir derecede ağırlık ve ürün kayıp giderleri bakımından diğer yanma odalarından üstündür. Basınç kaybı diğer yanma odalarına göre daha azdır, böyle olması fark edilir derecede motor termodinamik çevrimine fayda sağlamaktadır.



Şekil 5.3. Dairesel yanma odası

5.3. Yanma Odası Genel Düzeni

Yanma odası türleri bir önceki kısım da verilmiştir. Fakat görsel olarak yanma odaları bir difüzör, bir gövde, bir gömlek, bir yakıt püskürtücü ve havalandırma kısmından meydana gelmektedir. Bütün genel görünüş Şekil 5.4.'de verilmektedir.



Şekil 5.4. Yanma odasının genel görünümü

5.3.1. Diffüzör

Yanma odasına giren gaz genellikle yüksek hızda olmaktadır. Bu hız basınç düşümüne neden olur (bu basınç düşümü soğuk kayıp olarak adlandırılır). Ayrıca eğer hava yüksek hıza sahipse alev yanma odasında varlığını sürdüremez. Bundan dolayı, hava akışının yavaşlatılması gerekmektedir ve bu kesinlikle diffüzörün görevidir.

Diffüzörler ne kadar çabuk hızı azaltabildiklerine göre birbirlerinden ayrılabilirler. Depolu diffüzör de yavaşlatma hızlı bir biçimde olurken, aerodinamik diffüzörde akış hızı yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir. Depolu diffüzör de daha fazla kayıplar görülür, fakat daha küçüktür. Bu nedenle temel olarak hava taşıtlarının motorlarında kullanılır.

5.3.2. Gövde ve gömlek

Hava akışı diffüzörü geçtikten sonra, gömlek tarafından bölünür. Hava akışının bir bölümü gövde ve gömlek arasındaki bölüme gider ve bu bölüme dairesel kısım denir. Diğer bir bölümü de yakıtın enjekte edildiği karışım odasına gider. Akışı ayırmanın birkaç nedeni vardır. Birincisi hava-yakıt doğru değerinde olmalıdır. Eğer çok fazla ise ateşleme olmayacaktır. Hatta diffüzörden gelen hava akışının hızı hala fazladır ve biraz daha yavaşlatılmasına ihtiyaç duyulur. Gömlek üç bölüme ayrılır. Birinci bölüm (BB), ikinci/orta bölüm (İB/OB) ve seyreltme/üçüncü bölüm (SB/ÜB). Birincil bölümün ana görevi hava ile yakıtın karışımı ve yanması için gerekli zamanı sağlamaktır. İkinci bölümün amacı tam yanmanın gerçekleşmesi için yeterli zamanı sağlamaktır. Önemli bir biçim de CO ve yanmamış hidrokarbonlar gibi kötü reaksiyon ürünlerinin azaltılmasını sağlar. Son olarak üçüncü bölümün amacı çıkıştaki akış sıcaklığını türbin için makul değere azaltmak.

5.3.3. Yakıt enjektörü

Bu kısım yakıtı akışa enjekte eder. Yakıtın alev alanına girmeden önce buharlaştırılmış olması önemlidir. Aksi halde doğru bir biçimde yanma gerçekleşmez. Buharlaşmayı düzenlemek için yakıt atomlarına ayrılmalıdır(püskürtülmelidir). Bunun anlamı yakıtın küçük damlalara dönüşmesidir. Bu buharlaşma oranını artırır. Bunu

başarmak için bir püskürtücü kullanılmalıdır. Küçük parçalarına ayırma işlemi yüksek bağıl hızda hava akışına göre yapılmalıdır. Basınç-yardım püskürtücüler yakıtta yüksek bir hız kazandırdığı söylenebilir. Diğer bir yandan, ani hava patlama püskürtücüleri yavaş hareket eden yakıtı yüksek hızdaki hava akımına enjekte edebilir.

5.3.4. Alev dengeleyici

Yakıt akışın içine enjekte edildikten sonra, akış alev bölgesine doğru gider. Alevin havaya uçmamasından emin olmak için akış birinci bölümde tersine uygulanabilir. Bu akışın ters yönde olmasına neden olur. Bunun en iyi yolu akışı döndürmektir. İki önemli döndürme şekli vardır bunlar; aksiyal ve radyal döndürmedir. En önemli avantajı bunun akış hızı çeşitlilik gösterir. Böylece bir noktada hava akış hızı alev hızı ile eşleşecektir (Alev hızı hava akışına bağlı alevin yer değiştirme hızıdır).

5.3.5. Havalandırma

Gömlek yanma sırasında yüksek sıcaklıklara ulaşır ve bu yüzden dairesel kısımda hava akışı kullanılarak havalandırılmaya ihtiyacı vardır. Bunu gerçekleştirmenin birkaç yolu vardır. Sınır tabaka havalandırması, delikler gömlek etrafına istiflenir, koruyucu bir tabaka oluşturulur. Bu delikler gömleğin iç yüzeyinden hava enjekte eder. En iyi havalandırma yolu eşit şekilde transpirasyon havalandırma yöntemidir. Bu tür havalandırmada gömlek duvarı delikli materyalden oluşturulur ve bu materyal havanın içinden geçmesine izin verir. Bunun yanında gömleğin iç yüzeyi üzerine metal levha koyabiliriz. Bu işlem koruma da sağlar. Son olarak dairesel borudan geçen hava akışı da otomatik bir şekilde taşıma ile havalandırma sağlar.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ANALİZ VE HAD GENEL BAKIŞ

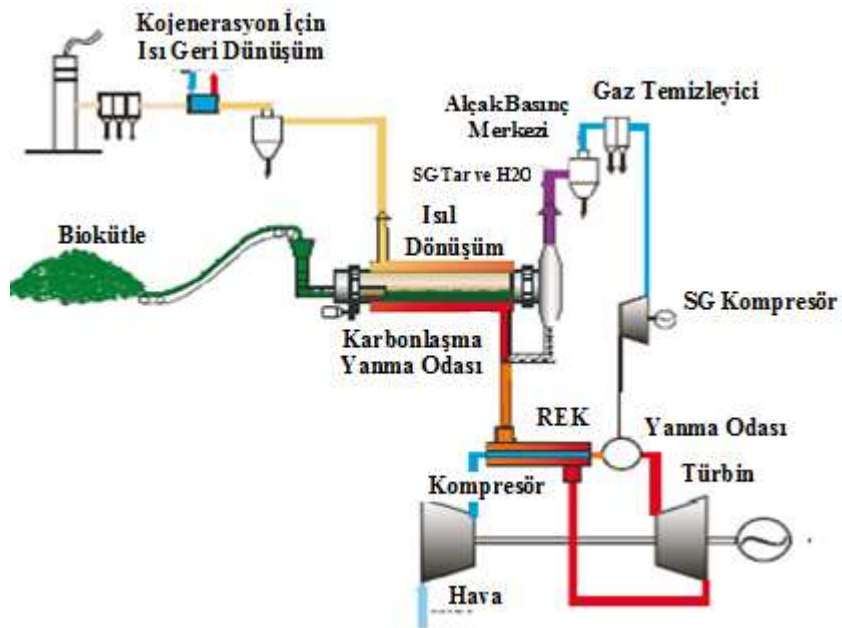
6.1. Giriş

Özel olarak geliştirilmiş enerji sistemleri veya geleneksel olarak kullanılan sistemler aracılığı ile fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması için biyokütleden türetilen yakıtın kullanılması uygulanabilir elverişli bir stratejidir. Katı biyokütle piroliz prosesi, gaz türbinlerinde kullanılacak Sentetik Gazın (SG) elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Mikro gaz türbinleri genellikle gaz yakıtlarla çalıştırılır ve küçük ölçekli güç dağıtımı için geliştirilmiştir. Büyük boyutlardaki zayıf-ön karışım gaz türbinleri ile karşılaştırıldığında, mikro türbin yanma sistemi basit bir tasarım ile tipik olarak karakterize edilebilir. Örnek olarak zengin karışım-soğutma-zayıf karışım ayarlaması sağlanabilen bir sistem. Bu konsept tam olarak ön karışma olmayan yanma sağlamak ve tam ön karışım operasyonlarından daha güvenilir aynı zamanda yakıt türü bakımından daha esnektir. Bununla birlikte birleşik piroliz ve/veya gazlaştırma prosesinden elde edilen düşük ısı değerli biyokütle kaynaklı yakıtlardan faydalanılması, belirtilen bu sistemde detaylı bir şekilde incelenebilmektedir. SG sonuçları önemli bir şekilde doğal gaza kıyasla farklılık göstermektedir (bileşimi, düşük ısı değeri, hidrojen içeriği, parçacık ve tar oluşumu açısından). Bunlar ateşleme problemlerine, yanma düzensizliklerine, yüksek emisyon yayılımı ve kirliliğe dönüşebilir. Deneysel araştırmanın yanında, yanma odasının HAD simülasyonları bu gazların kullanımında ortaya çıkacak problemleri anlamak, var olan geometrileri iyileştirmek, düşük ısı değerli gazların kullanımı için yeni nesil yanma odalarının geliştirilmesini sağlamak amacıyla anahtar bir çalışmadır.

6.2. Deney Düzenegi

Birleşik Piroliz Rejeneretör (IPRP) teknolojisi Perugia Üniversitesinde (İtalya) biyokütleden elde edilen sentetik gazdan elektrik üretmek ve yavaş piroliz sürecini incelemek ve çalışmak için orijinal olarak geliştirilen, test ve optimize edilen bir teknolojidir. BPR teknolojisi Şekil 6.1’de gösterilen deney setinde kurulmuştur ve kullanılan mikro türbin ticari olarak uygundur. Biyokütle dönel fırın pirolizere besleme

gözünden verilmektedir. Biyokütlenin oksijen eksikliği içinde sentetik gaz, tar, kömüre dönüştürüldüğü dönel reaksiyon odası MGT'den dışarı atılan gaz alev borusu ile ısıtılmaktadır. Proliz işleminden açığa çıkan gazlar bir ısı değiştiriciye kojenerasyon amacı ile iletilmektedir. Bu işlemde elde edilen SG mikro türbine zarar verecek kimyasal bileşiklerden temizlenir, ayrıca su vererek temizleme işlemi ile SG soğutulur böylece buhar halindeki su ve tar yoğunlaşır. Son olarak SG MGT yanma odasına enjekte edilir, bu sırada kirletici maddeler sonraki yanmaya görevlendirilir. Mikro gaz türbininden gelen alev gazlarının ısı enerjisi, rejeneratörde mikro gaz türbini birincil hava kısmına ve sonrada fırın reaktörüne ek ısı sağlamak için geri alınır. Enerji sistemleri ile ilgili evrensel birkaç bilgi Tablo 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Birleşik piroliz-MGT deney düzeneği şeması (Fantozzi, et al., 2010)

Table 6.1. BPR ısı ve çevresel performans

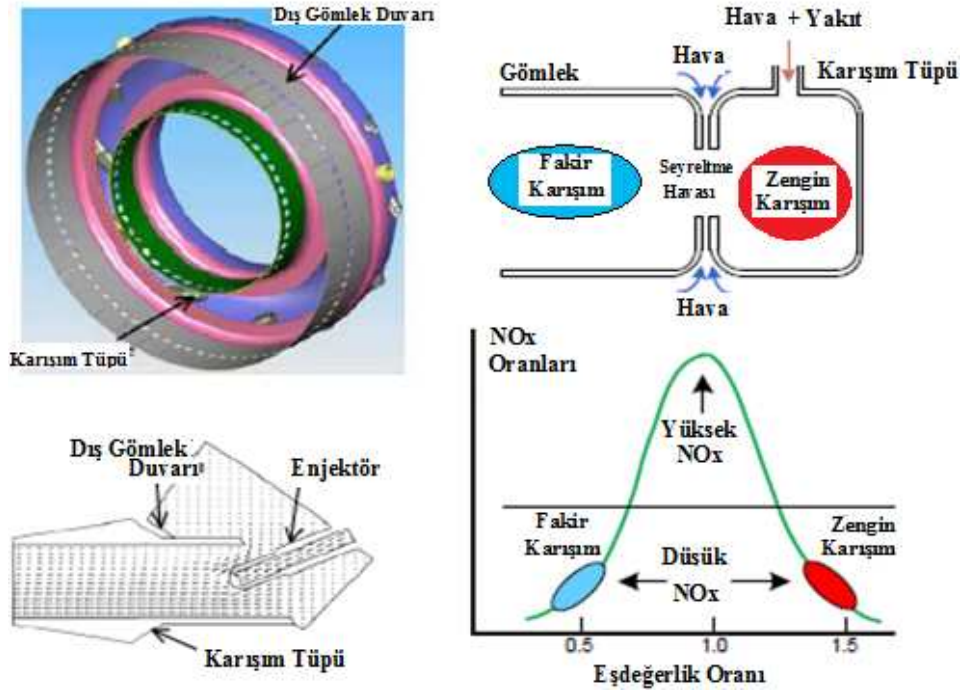
Parametre	Değer	Birim
Net elektrik güç	65	kW
Biyokütle tüketimi	730	Ton/yıl
Yıllık elektrik üretimi	400000	kWh
Dönüşen verim	18.8 %	-
CO ₂ üretimden kaçınma	290	Ton/yıl

6.3. Mikro Türbin Yanma Odası Karakteristiği

Araştırmaların yapıldığı mikro türbin ticari olarak uygun olan rejeneratörlü mekanizma (Elliot TA 80, Ebara Groups), doğal gaz yakıt olarak kullanıldığında 80 kW güç çıktısı ve %28 net elektrik verimliliğindedir, Ek açıklamalar C’de sistem katalogu verilmiştir. Tasarım basınç oranı 4.0 ve nominal türbin giriş sıcaklığı yaklaşık olarak 900°C, bu değer gelişmiş türbin soğutma sistem gereksinimine gerek duymamaktadır. Yanma odası olarak dairesel yanma odası kullanılmıştır. Şekil 6.2, Perugia Üniversitesinde çalıştırılmakta olan rejenerasyonlu MGT dairesel yanma odası gösterilmiştir. Mimari bakımından dış ve iç gömlek duvarlarının, yanma odasının içine doğru çıkıntı yaptığı daralma bölgesi tarafından dairesel bölümün iki hacme bölündüğü tipik bir zengin karışım-soğutma-zayıf karışım konseptli yanma odasıdır.

Birinci zengin bölge (yanmanın nominal eşdeğer oranı $\Phi = 2$ değeri ile gerçekleştiği bölge) ısı değiştiriciden gelen havanın, nozuldan gelen yakıt gazı ile karıştırıldığı Şekil 6.2’de detaylı olarak gösterilen bir dizi teğetsel karışım tüpü içerir.

Zengin karışım, karışımı seyreltmek için gereken havanın dikdörtgen şeklindeki iç ve dış kısımda bulunan deliklerden sağlandığı ikinci bölgeye boğaz kısmından ulaşır.



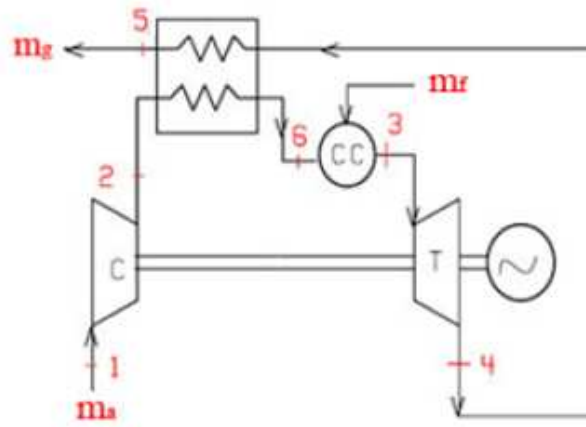
Şekil 6.2. Çalışılan MGT yanma odası gömleği ve zengin bölge karışım borusu (Fantozzi, et al., 2010)

İkinci bölümde yanma zayıf karışım koşullarında tamamlanır. Üçüncü bölümde daha fazla seyreltme için dairesel delikler vardır, Şekil 6.2.'de görülebilir. İkinci kısım açık ve direk olarak iç gömlek duvarı tarafından sınırlandırılmış hacme yerleştirilmiş radyal türbinin giriş nozuluna bağlantılıdır; yanma ürünleri böylece basınçla 90° itilerek türbine girer ve diğer bir 90° açı ile türbin rotoruna giriş yapar. Giriş kısmına göre bu ürünlerin hareketi tersine döner, böylece türbin çıkışında ürünler rejeneratörün sıcak bölümüne girer. Karışım borusuna, boğazdaki dikdörtgen deliklere ve iç ve dış duvardaki dairesel deliklere, bütün yanma odasını içeren ve direk olarak rejeneratör hava çıkışına bağlantılı kompresörden hava sağlanır.

6.4. Deneysel Çalışma

MGT sistemi sıcaklık, basınç ve belirlenmiş alandaki gaz akış yolunu (Şekil 6.3) ve hatta alev borusu kirli gaz emisyonlarını ölçmek için algılayıcılarla donatılmıştır. Özellikle akış basınç ve sıcaklık ölçüm cihazları kompresör giriş ve çıkışında, türbin

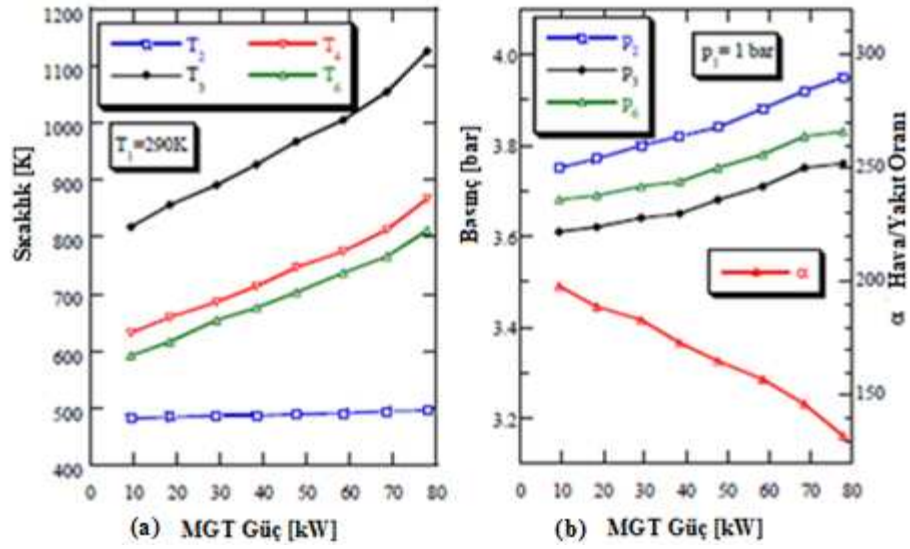
çıkışında ve yanma odası girişinde bulunmaktadır. Yakıt debisi ve çıkış gücü de ölçülebilmektedir. Gaz sıcaklığı 750°C sıcaklığa kadar olan aralıkta, hassasiyeti $\pm 0.25\%$ eşit Pt direnç termometreleri (Euromisure, ek olarak JUMA DTRANS aktarıcı) ile ölçülebilmektedir. Basınç ölçümleri 1-5 bar çalışma aralığında hassasiyeti $\pm 0.1\%$ olan iki-telli bir basınç çevirici (Foxboro IGP10) ile gerçekleştirilmektedir. Akış debisi ölçümü 10-45 Nm^3/h aralığında karakterize edilmiş ve hassasiyeti $\pm 0.5\%$ olan bir vorteks akış ölçer ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.3. MGT deney düzeneğinin şematik gösterimi

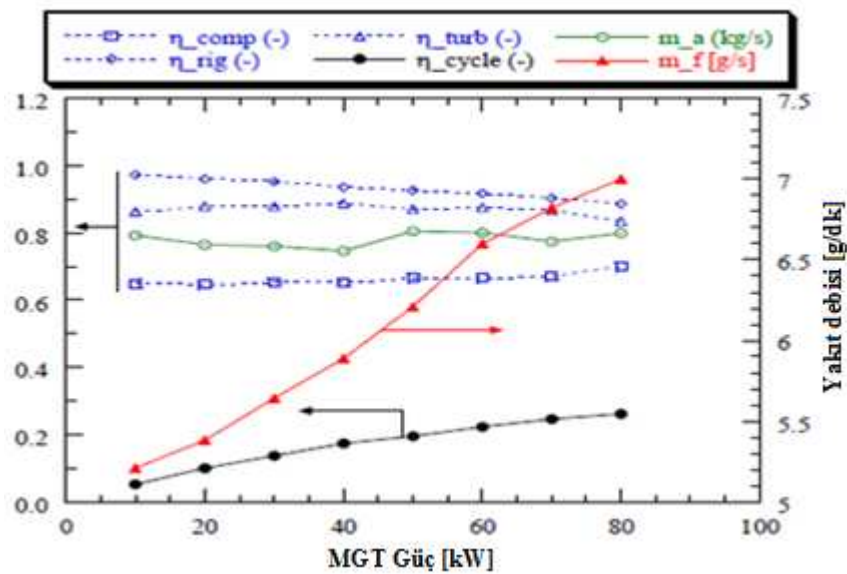
Emisyon ölçümleri Lancom III (Metek) gaz analiz eden cihazla gerçekleştirilmiştir. Cihaz alev gazındaki CO, CO₂, O₂, NO, NO₂, NO_x, SO₂, H₂S, ve C_xH_y konsantrasyonunu $\pm 2\%$ hassasiyet ile ölçmektedir. Kıyaslanabilir bilgi çıktıları Windows™ tabanlı egzoz emisyon ölçümlerini direk olarak gaz analiz aracından ölçerek kaydeden birleşik bilgi edinme yazılım programı Insight ile gerçekleştirilmiştir.

Deneysel analizler sistem çalışmasının tam olarak incelenebilmesi için değişik güç yüklemelerinde için tam yüklemeye (10 kW civarında) olan aralıkta gerçekleştirildi. Deneysel çalışmalar sırasında bazı önemli veriler doğal gaz kullanılması durumunda kaydedilmiştir ve Şekil 6.4.'de sunulmaktadır. Türbin çıkış sıcaklık değerleri Şekil 6.5.'de gösterilmektedir fakat ölçüm yapmak yerine yanma odası ısı enerji dengesi hesaplanarak bulunmuştur.



Şekil 6.4. MGT yükleme-sıcaklık (a) ve yükleme-basınç grafikleri (b)

MGT çevriminin termal verimliliği (η_{cycle}), kompresör izentropik etkinliği (η_{comp}), türbin etkinliği (η_{turb}) ve ısı değiştirici etkinliği (η_{rec}) ölçülen gaz yolu değişkenleri temel alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.5’de verilmektedir. Dahası hava debisi (m_a) ve hava/yakıt oranı (α) MGT egzozunda ölçülen gaz konsantrasyonları temel alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.5. Deney sonuçlarına göre hesaplanmış verimlilik değerleri

Tablo 6.2. Değişik MGT yüklemelerinde doğal gazın yanma sınır koşulları

Güç (kW_{EL})	10	20	30	40	50	60	70	80
\dot{m}_a (kg/s)	0.086	0.083	0.087	0.085	0.085	0.089	0.083	0.073
T_f [K]	592	616	654	676	703	737	766	812
P_a [bar]	3.682	3.694	3.712	3.724	3.745	3.784	3.822	3.834
\dot{m}_f (kg/s)	4.3E-4	4.4E-4	4.7E-4	4.9E-4	5.1E-4	5.5E-4	5.6E-4	5.5E-4
T_a [K]	290							
P_f	5.8							

Tablo 6.3. Sentetik gazın tam yükleme (80kW) koşulunda yanma sınır koşulları

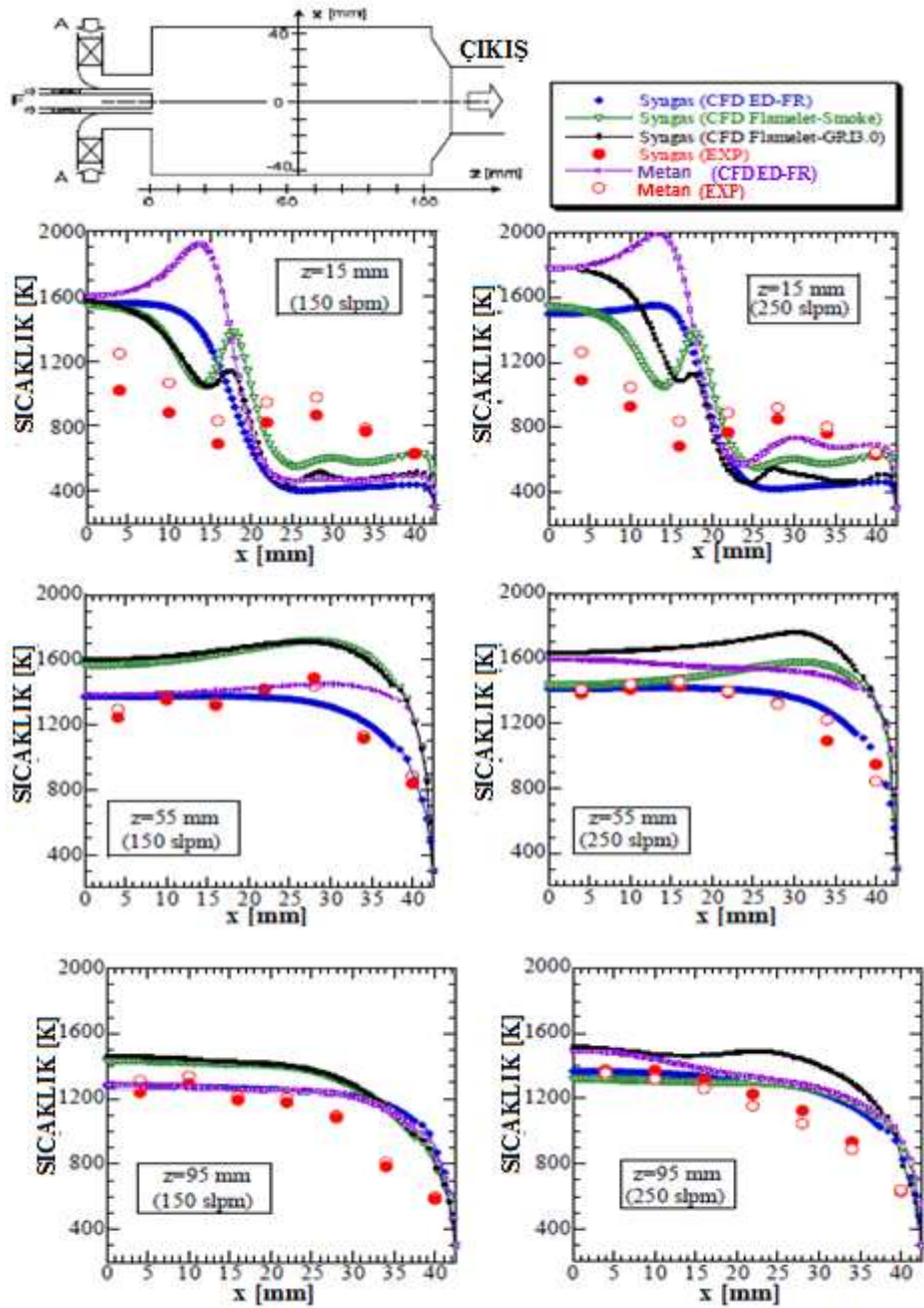
Power (kW_{EL})	80
\dot{m}_a (kg/s)	0.0369
T_f [K]	290
P_a [bar]	3.834
\dot{m}_f (kg/s)	0.0369
T_a [K]	812
P_f	5.8

6.5. Nümerik Analiz Yönetimi

HAD simülasyonları sürekli ve kararlı durum çalışmadaki yanma odası içinde gerçekleşen ortalama türbülans reaktif akış RANS metodu çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan RANS aracı ilerleyen kısımlarda özet bir biçimde verilecektir.

6.5.1. Nümerik modelleme yaklaşımı

FLUENT sonlu hacimler yöntemini kullanan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımıdır. Bu program sistem performansını deneyden bağımsız olarak ölçme, sorunlar varsa bunu bilgisayar aşamasında çözebilme imkânı sağlar. Bu çalışmada yanma odası birebir modellenmiştir. Ana model oluşturulduktan sonra yapılması gereken iyileştirmeler bu modele uygulanmıştır. Buradaki amaç gerçeğe en yakın modeli oluşturmaktır. Yanma odası periyodik olduğundan çalışmanın yapıldığı kısım bütün hacmin 30°'lik bir kısmıdır (modelleme kısmında değinilecektir), bu kısım karışım tüpü (Şekil 6.2'de gösterilen havanın yakıtla karıştığı bölüm) ve bir yakıt nozulundan (kısmen kullanılan yakıtın cinsine göre değişen nozul) meydana gelmektedir. MGT iç akış-alanı Fluent 6.3 programında SIMPLE algoritma, Hız-Basınç çifti ve açık (implicit) çözüm zamandan bağımsız kullanılarak; standart duvar fonksiyonları ile "standard k-ε" türbülans modeli seçilerek gerçekleştirilmiştir. Enerji denklemi sıcaklık değerlerinin alınabilmesi için aktif hale getirilmiştir. Yanma süreci birkaç model yaklaşımı ve alternatif kimyasal reaksiyon tepkimeleri aracılığı ile düşünülmüştür. Başlangıç MGT araştırması, RANS simülasyonlarının ortalama reaktif akış hakkında yeterli bilginin sağladığını ve ısının açığa çıktığı bölüm, yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığı bölümü aydınlatmaya yeterli olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, bu başlangıç çalışması, yerel veya en azından genel termal ısı özelliklerinin yeterli doğruluğunu nümerik olarak yeniden türetmek için doğru model seçiminin yapılması ve çalıştırılması gerektiğinin altı çizilmelidir. Yanma odasının ileri araştırması ve sentetik gaz kullanımı için uygun modeli bulmak amacıyla kimyasal mekanizma basit bir geometride çalışılmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. Basit geometride çalışılan yanma modeli sonuçları (Fantozzi, et al., 2010)

Bu çalışma ED-FR ve Flamelet yanma modellerinin uygulanabilir araçlar olduğunu, kullandıklarında kimyasal mekanizmalarının yeterli olduğunu göstermektedir (Şekil 6.6. iki akış debisi için HAD ve deneysel sıcaklık değerleri göstermektedir). Bu çalışmada, MGT türbülans reaktif akış, azaltılmış kimyasal mekanizma ED-FR yaklaşımı ve detaylı kimyasal mekanizmaya sahip “flamelet GRI 3.0” yaklaşımı ile çözümlendirilmiştir. ED-FR model, bir transport denklemi yanmaya

dahil olan her bir kimyasal tür için çözülmüştür. Bu türlerin kaynak terimi kimya ve türbülansa bağlıdır, çoğu durumda türbülans daha etkilidir (Brinck, et al., 2000). Bu yaklaşım özellikle 3D simülasyonlarında, hesaplama zamanının üstesinden gelmek için basit bir reaksiyon mekanizması tanımlar. ED-FR ön-karışmalı ve ön-karışmasız yanma ile kullanılabilir ve bu çalışmada hava ve yakıtın karışım odasında kısmen karıştığı durumda uygulanabilir. Bu modelde kullanılan kimyasal mekanizma Jones ve Lindstedt, 1988 (bkz. Tablo 6.4.), Zeldovich termal NO_x mekanizması formatıyla birleştirilmiştir.

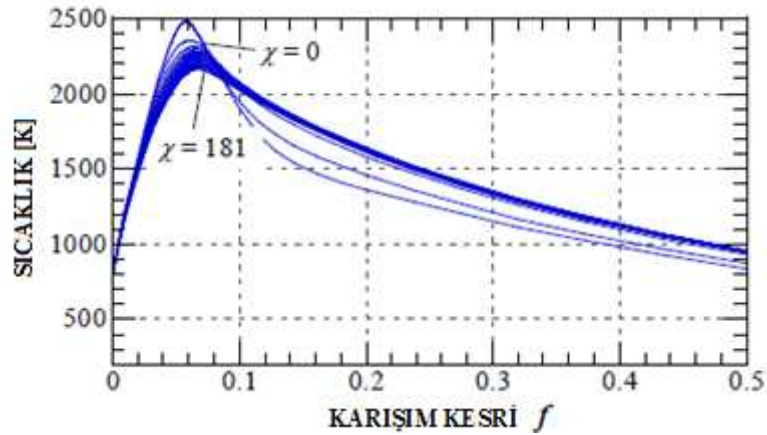
Tablo 6.4. Jones ve Lindstedt mekanizması

Reaksiyon	Arrhenius reaksiyon oranları
1) $CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	$R_1 = 4.4 \cdot 10^{11} \cdot e^{-\frac{1.256 \cdot 10^8}{RT}} [CH_4]^{0.5} [O_2]^{0.5}$
2) $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	$R_1 = 3.0 \cdot 10^8 \cdot e^{-\frac{1.256 \cdot 10^8}{RT}} [CH_4][H_2O]$
3) $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	$R_3 = 6.76 \cdot 10^{15} \cdot T^{-1} \cdot e^{-\frac{1.67 \cdot 10^8}{RT}} [H_2]^{0.25} [O]^{1.5}$
4) $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	$R_4 = 2.75 \cdot 10^9 \cdot e^{-\frac{8.37 \cdot 10^7}{RT}} [CO][H_2O]$

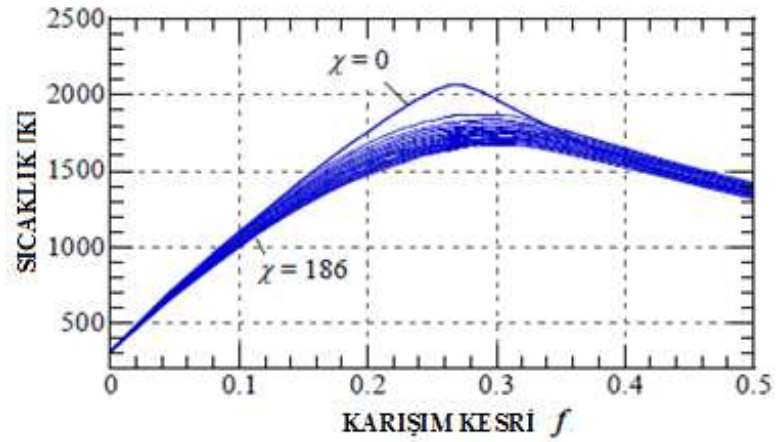
Diğer yandan “flamelet” yanma modeli de iç reaktif akışı analiz etmek için kullanılmıştır ve bu çalışma sonuçlarında ağırlıklı olarak Flamelet modeline göre incelemeler yapılacaktır. Bu modele göre ön karışma olmayan yanma modeli, boyutsal olmayan akış parametresi, yakıt-hava karışım alanını tanımlayarak (hava akışında “0”a eşit, yakıt akışında 1’e eşittir) türbülans alev cephesinin karışım kesri aracılığı ile hesaplanır. Flamelet yaklaşımı, karışım kesrinin ve onun varyansının taşınım denklemlerini hesaplar. Karışım bölgesi bir kez çözüldüğünde alev yerel özellikleri,

laminer alev dış bilgisini kullanarak, varsayılan kimyasal reaksiyon mekanizmasına bağlı ön hesaplama yaparak (sıcaklık, kimyasal türlerin konsantrasyonu, vb.) karışım kesrinin f ve skalar dağılmanın χ (denge etkisi olmayan durumlarda kullanılan bir parametre, denge durumlarında 0'dır) bir fonksiyonu olarak hesaplanır. Bu modelde detaylı kimyasal yol, direk olarak HAD simülasyonunun süresini arttırmadan kullanılabilir. Flamelet simülasyonları için GRI3.0 mekanizması kullanılmıştır. Bu kimyasal model 53 tür ve 325 kimyasal reaksiyondan oluşmaktadır ve NO_x formülasyon yolunu içermektedir. Ayrıca bu model doğal gaz-hava yanmasından orijinal olarak türetilmiştir. GRI 3.0 sentetik gaz kullanıldığında gazın içerdiği CH_4 , CO ve H_2 yanma mekanizmasında gerçekleştirebilir.

Flamelet sıcaklık dağılımı, seçilen mekanizmaya göre hesaplanarak HAD simülasyonunda giriş verisi olarak da kullanılmıştır, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 sırası ile CH_4 ve SG-hava yanmasının sıcaklık dağılımının farklı skalar yayılım değerlerinde göstermektedir. CH_4 için ilgili karışım kesri için düşükken maksimum adyabatik sıcaklık yüksek (yaklaşık 2500 K, SG için 2050 K) olduğu görülebilmektedir.



Şekil 6.7. CH_4 -hava flamelet modeli sıcaklık dağılımı (Fantozzi, et al., 2010)



Şekil 6.8. SG-hava flamelet modeli sıcaklık dağılımı (Fantozzi, et al., 2010)

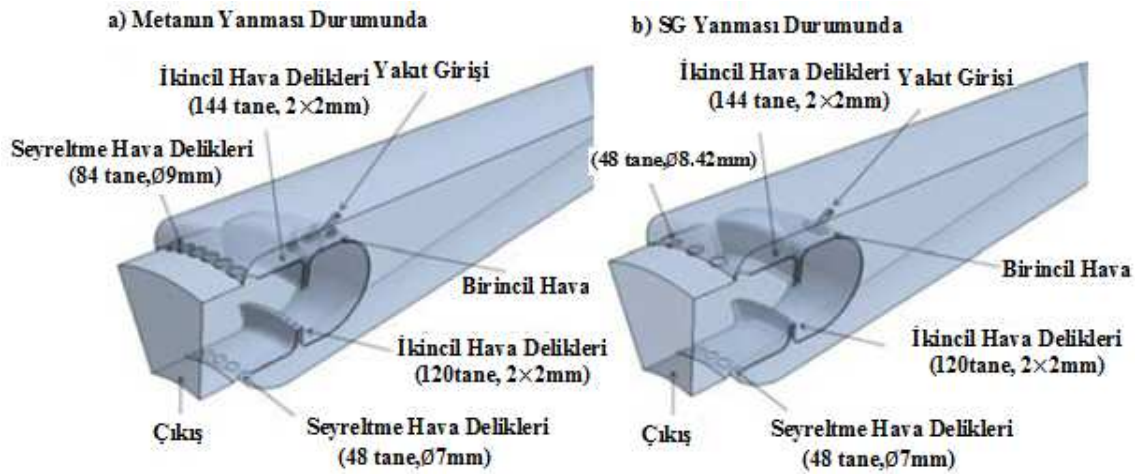
6.5.2. Sınır koşulları

Yanma odasının HAD simülasyonu, aşağıda açıklanmış olan ölçüm parametreleri doğal gaz çalışması için giriş verisi şeklinde kullanılarak farklı yükleme koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm parametreleri; MGT giriş hava debisi, sıcaklığı, basıncı ve yakıt giriş debisi ve yakıt giriş sıcaklığıdır. Dahası hava ve yakıt giriş akışındaki türbülans yoğunluğu 10% olarak tahmini olarak değer biçilmiştir. Gömlek duvarları boyunca meydana gelen ısı transferinin 3D simülasyonu yerine, gömlek iç duvar sıcaklığı sabitlendi: duvar sıcaklık değerleri her bir yükleme koşulu için ısı transferi metodu içeren 2D simülasyonları ile elde edildi. SG kullanımı durumunda Tablo 6.5'de verilen sentetik gazı oluşturan bileşimler dikkate alınarak simülasyon gerçekleştirildi. Biyokütleden elde edilen sentetik gazın alt ısıl değeri $H_u=10507$ kJ/kg olarak hesaplandı (Bölüm 6'da detaylı olarak verilmiştir). SG için yakıt giriş debisi doğalgaz kullanıldığında elde edilen termal güç ile aynı olması için yeniden hesaplandı.

Tablo 6.5. Sentetik gaz bileşimi (hacimsel oran)

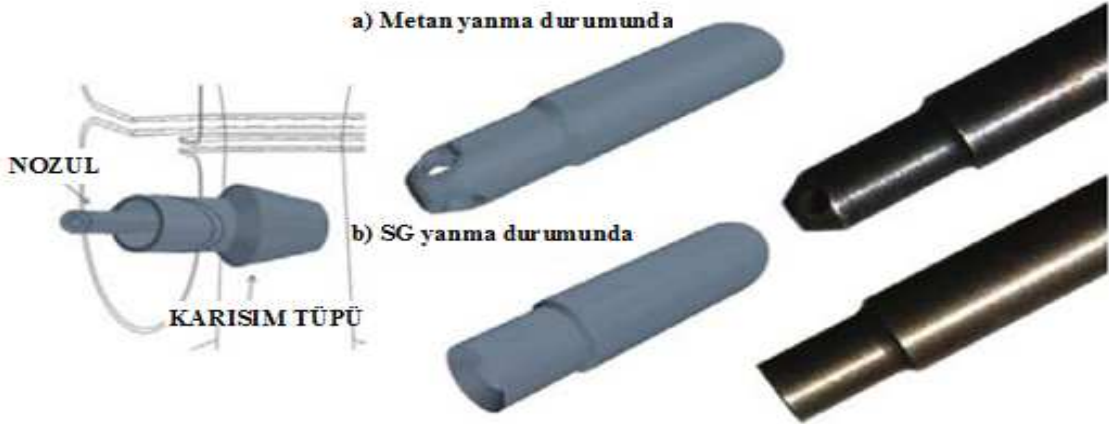
CH_4	CO_2	CO	H_2	H_2O
21	38	29	7	5

Mikro türbin yanma odası SG kullanımına adapte etmek için kısmen değişikliğe uğratılmıştır. Şekil 6.9. SG ve metan için kullanılacak incelemelerin gerçekleştirildiği iki yanma odasını göstermektedir. Temel olarak geometrilerin farklılığı; seyreltme kısmındaki gömlek dış duvarındaki deliklerin sayısı ve çaplarıdır. SG kullanıldığında daha az seyreltme deliği koyularak türbin giriş kısmında düşük sıcak elde edilmesinden kaçınılmıştır.



Şekil 6.9. Metan (a), SG yanması (b) için geometri modelleri

Aynı zamanda karışım kanalı içindeki nozul da daha fazla yakıt debisi kabul edebilmek amacıyla SG kullanıldığı durum için değişikliğe uğratılmıştır. Şekil 6.10 iki değişik nozul tipini göstermektedir.

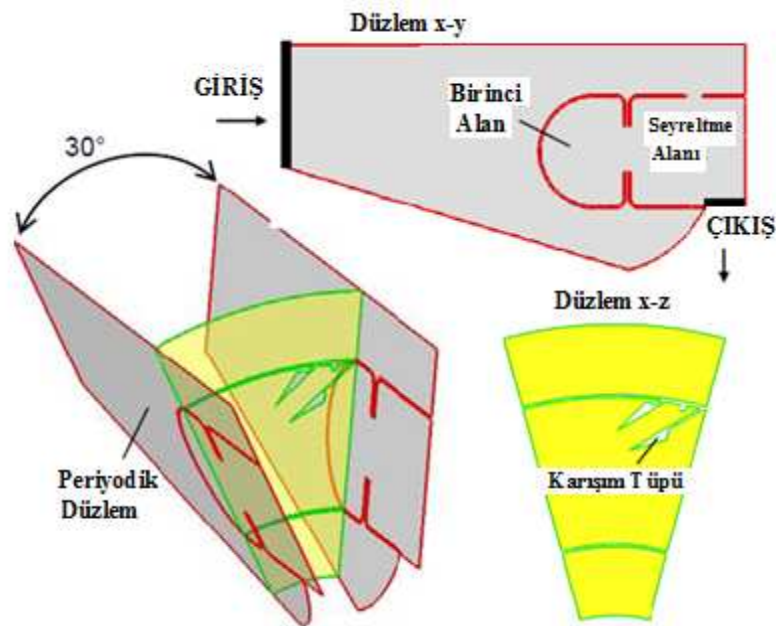


Şekil 6.10. Metan (a), sentetik gaz (b) için yakıt nozulları (Fantozzi, et al., 2010)

Metan için kullanılan nozul üç radyal deliğe sahiptir, SG için kullanılan nozul yakıt püskürtme için aksiyal yönde tek bir bütün enine kesit şeklindedir. Bu değişiklik yakıtın debisinin verilen yüklemeye için arttırılabilmesine izin verir, metan operasyonuna kıyasla hız kayıplarının azalmasını sağlar.

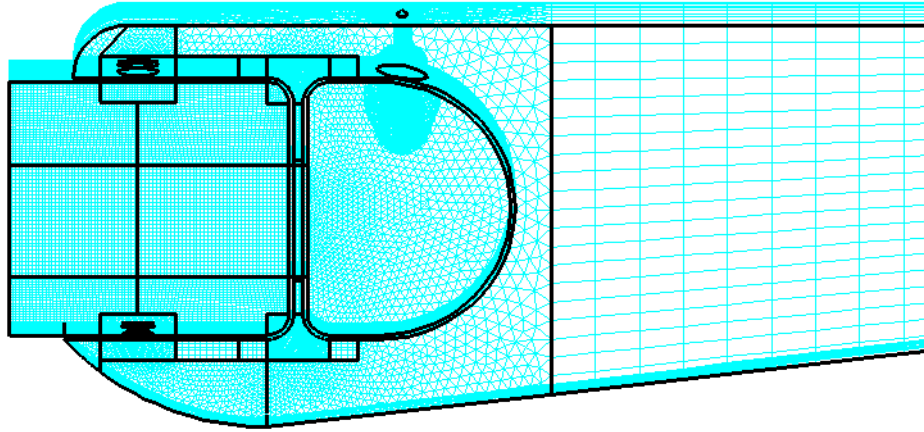
6.5.3. Geometrinin modellenmesi

Ağ yapısının oluşturulması, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve sonlu elemanlar analizlerinde kullanılabilen genel amaçlı geometri ve ağ oluşturma aracı olan GAMBIT programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. GAMBIT iki boyutta dörtgen ve üçgen elemanların, üç boyutta ise altı yüzlü, dört yüzlü ve geçiş elamanları olarak kama tipi ve piramit tipi elemanların kullanımına izin vererek istenilen tipteki sayısal ağın basit ve hızlı şekilde oluşturulmasına imkân verir. Bu çalışmada birbirine yakın iki geometri (sentetik gaz ve metan geometrileri) için ağ yapısı oluşturulmuştur ve birbirine yakın olduğu için tek bir geometri için ağ örgüsü gösterilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarında kullanılacak kontrol hacmi Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Hesaplamaların yapılacağı model bütün yanma odasının 30° dairesel kısımdan (periyodik koşullar altında) oluşmaktadır.

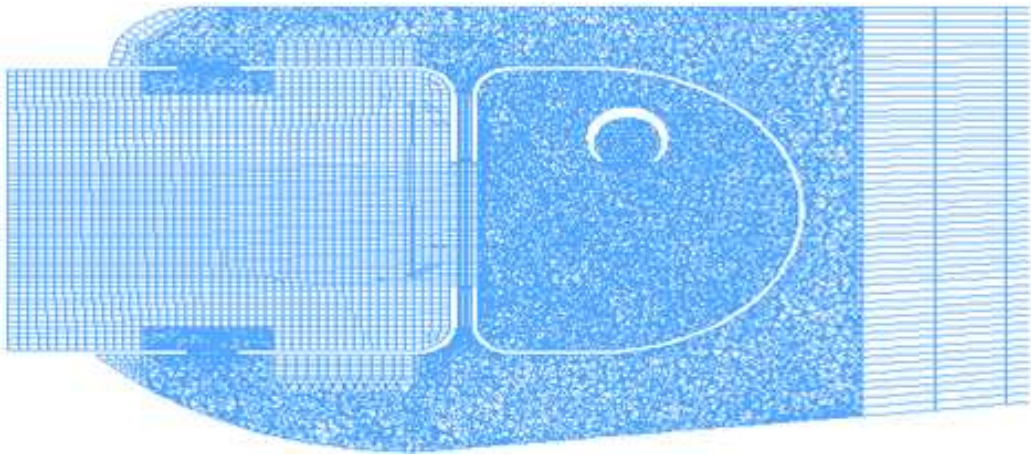


Şekil 6.11. HAD yazılımında kullanılacak temel geometri

Çözümlemeler için en uygun ağ yapısı ve sayısı farklı çözümlerle elde edilmiştir. Mesh ağı oluşturmak için geometri bir kaç blok ve hacme bölünmüştür ve Şekil 6.12’de gösterilmektedir. Simetrik yüzeylere “link” işlemi uygulandıktan sonra oluşturulan ağ hücresi yaklaşık olarak 1500,000 elementten oluşmaktadır. Fluent programının $1,6 \times 10^6$ ağı üzerindeki modelleri için NO_x çözümünde başarılı olmadığı görülmüştür. Bilgisayar işlemcisi ve bellek kullanım oranı bu sonucun nedenleri arasındadır. Detaylı incelenmesi gereken bölümlerde ağ yapısı daha sık oluşturulmuş ve daha sonra sınır şartları belirlenmiştir. Simülasyonlar için hazır hale getirilmek üzere geometri üzerinde temizleme işlemleri gerçekleştirilerek sonuçları etkileyecek unsurlardan kaçınılmıştır.



Şekil 6.12. Ağ yapısının ve oluşturulan hacimlerin görünümü (x-y düzlemi)



Şekil 6.13. Ağ yapısının 2D görünümü (x-y düzlemi)

BÖLÜM 7

SAYISAL ANALİZ ÇALIŞMA

7.1. Doğal Gaz İçin Durum Çalışması

Çalışılan mikro türbinin girdi verileri, Brayton çevrimi denklemlerinin çözümü ve HAD simülasyonunun önemli parametrelerini belirlemek için gereklidir. Yanma odasında birbiri ile etkileşim içinde bulunan hava ve yakıtın akış debisini hesaplamak dikkate değer bir konudur. Çalışma koşullarındaki varsayım değerleri takip eden adımda, birincil bölgede karışım eşdeğer oranını ($\Phi = 2$) kabul ederek verilmiştir.

- Alt ısı değeri $H_{u(CH_4)} = 50000 \frac{kJ}{kg}$
- Yanma odasının verimi $\eta_{YO} = 0.98$
- Türbin giriş sıcaklığı , $T_3 = 1173K$
- Kompresör oranı $\beta = 4$
- Çevre sıcaklığı $700^\circ C : C_p = 1.07 \left(\frac{kJ}{kgK}\right)$
- Yanma odasından çıkan gaz debisi;

$$m_f = 1.7 \left(\frac{lbs}{dk}\right) = 1.7 \times 0.4536 \left(\frac{kg}{dk}\right) = 0.7711 \left(\frac{kg}{dk}\right)$$

- $T_1 = 300K$ and $P_1 = 1 bar$
- $k = 1.4$
- $\eta_{pc} = \eta_{pe} = 0.8$
- $\varepsilon = 0.8$

Dört bilinmeyenli ($T_{2'}$, T_4 , T_5 ve $\dot{m}_{yakıt(CH_4)}$) dört denklemden oluşan (kompresörde sıkıştırma, türbin de genişleme, yanma odasında enerji dengesi ve ısı değiştiricinin verimliliği) sistem düşünülmelidir.

$$\frac{T_{2'}}{T_1} = \beta^{\frac{k-1}{k} \eta_{pc}} \quad (7.1)$$

$$\frac{T_{4'}}{T_3} = \left(\frac{1}{\beta}\right)^{\frac{k-1}{k}\eta_{pe}} \quad (7.2)$$

$$\varepsilon = \frac{(T_5 - T_{2'})}{(T_{4'} - T_{2'})} \quad (7.3)$$

$$\dot{m}_{yakıt(CH_4)} \times LHV_{yakıt(CH_4)} \times \eta_{yo} = \dot{m}_f \times C_{pa} \times (T_3 - T_5) \quad (7.4)$$

Sistem çözümü;

$$\frac{T_{2'}}{T_1} = (\beta)^{\frac{(k-1)}{k}\eta_{pc}} = 300 \times (4)^{\frac{(1.4-1)}{1.4} \frac{1}{0.8}} = 492K \quad (7.5)$$

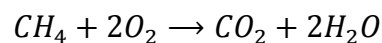
$$\frac{T_{4'}}{T_3} = \left(\frac{1}{\beta}\right)^{\frac{k-1}{k}\eta_{pe}} = 1173 \times \left(\frac{1}{4}\right)^{\frac{(1.4-1)}{1.4} \frac{1}{0.8}} = 854K \quad (7.6)$$

$$T_5 = \varepsilon(T_{4'} - T_{2'}) + T_{2'} = 0.8(854 - 492) + 492 = 782K \quad (7.7)$$

Bu noktada, metan debisi hesaplanabilir;

$$\begin{aligned} \dot{m}_{yakıt(CH_4)} &= \frac{\dot{m}_f \times C_{pa} \times (T_3 - T_5)}{LHV_{yakıt(CH_4)} \times \eta_{yo}} = \frac{0.7711 \times 1.07 \times (1173 - 782)}{50000 \times 0.98} \\ &= 0.006584 \left(\frac{kg}{dk}\right) \end{aligned} \quad (7.8)$$

Bundan sonraki adım hava akışının belirlenmesidir. Birincil alandaki eşdeğer oran $\Phi = 2$ olmasına göz önünde bulundurulmalıdır. Bu oran stokiyometrik karışımının metanın yanmasına oranına eşittir ($\Phi = \frac{\alpha_{st,CH_4}}{\alpha}$). Metanın oksidasyon reaksiyonu aşağıda gösterilmiştir;



Tepkiyenlerin moleküler kütlesi aşağıda verilmiştir,

$$W_C = 12 \left[\frac{kg}{Kmol} \right] \quad , \quad W_{CH_4} = 16 \left[\frac{kg}{Kmol} \right] \quad , \quad W_{O_2} = 32 \left[\frac{kg}{Kmol} \right] \quad , \quad W_{H_2O} = 18 \left[\frac{kg}{Kmol} \right]$$

$$W_H = 1 \left[\frac{kg}{Kmol} \right] \quad , \quad W_O = 16 \left[\frac{kg}{Kmol} \right] \quad , \quad W_{CO_2} = 44 \left[\frac{kg}{Kmol} \right]$$

Yanma reaksiyonu sırasında, 16 kg CH_4 , 64 kg O_2 ile veya 1 kg CH_4 , 4 kg O_2 ile yanabilmektedir ($\frac{Kg\ hava}{Kg\ yakıt} = 4$). Hava bileşimini göz önüne alarak (O_2, N_2) ;

$$Y_{O_2} = 0.23, Y_{N_2} = 0.77$$

$$\left[\frac{Kg\ hava}{Kg\ yakıt} \right] = \frac{1}{0.23} \times 4 \left[\frac{kgO_2}{kgCH_4} \right] = 17.4 \left[\frac{Kg\ hava}{Kg\ yakıt} \right]$$

$$\lambda_{st,CH_4} = 17.4 \left[\frac{Kg\ hava}{Kg\ yakıt} \right] \quad (7.9)$$

$$\Phi = \frac{\alpha_{st,CH_4}}{\alpha} = 2 \quad (7.10)$$

$$\alpha = \frac{17.4}{2} = 8.7 = \frac{\dot{m}_{hava-girişte}}{\dot{m}_{yakıt}} \quad (7.11)$$

Metanın akış debisinden birincil alandaki akış debisini bulmak mümkündür,

$$\alpha \Rightarrow \dot{m}_{hava-BB} = 0.006584 \times 8.7 = 0.057281 \frac{kg}{dk} \quad (7.12)$$

Buradan;

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{hava-BB} + \dot{m}_{hava-iB} + \dot{m}_{yakıt} \cong \dot{m}_f = \dot{m}_{hava-BB} + \dot{m}_{hava-iB}$$

$$\dot{m}_{hava-iB} = \dot{m}_f - \dot{m}_{hava-BB}$$

$$\dot{m}_{hava-iB} = 0.7711 - 0.057281 = 0.71382 \quad (7.13)$$

Havadaki oksijen ve azot içeriği göz önüne alınarak; ($Y_{O_2} = 0.23$ and , $Y_{N_2} = 0.77$)

$$\dot{m}_{O_2} = 0.23 \times 0.057281 = 0.013175 \quad (7.14a)$$

$$\dot{m}_{N_2} = 0.77 \times 0.057281 = 0.0441064 \text{ kg/dk} \quad (7.14b)$$

Toplam karışım akış debisi bulunabilir;

$$\dot{m}_{top} = \dot{m}_{yakıt} + \dot{m}_{hava-BB} = 0.057281 + 0.006584 = 0.063865 \text{ kg/dk} \quad (7.15)$$

Bu adımda her bir kimyasal tepkiyenin kütle oranını bulmak mümkündür;

$$Y_{CH_4} = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{top}} = \frac{0.006584}{0.060722} = 0.1031 \frac{kg_{CH_4}}{kg_{toplam \text{ karışım}}} \quad (7.16a)$$

$$Y_{O_2} = \frac{X_{O_2}}{\dot{m}_{top}} = \frac{0.013175}{0.063865} = 0.2063 \frac{kg_{O_2}}{kg_{toplam \text{ karışım}}} \quad (7.16b)$$

$$X_{N_2} = \frac{X_{N_2}}{\dot{m}_{top}} = \frac{0.041935}{0.063865} = 0.6906 \frac{kg_{N_2}}{kg_{toplam \text{ karışım}}} \quad (7.16c)$$

Açıkça toplamları bire eşit olmaktadır $\sum_i Y_i = 1$.

7.2. Sentetik Gaz İçin Durum Çalışması

Biyokütleden türetilen sentetik gazın bileşimi aşağıda gösterildiği gibidir;

- $CH_4 = 21\%$
- $CO_2 = 38\%$
- $H_2 = 7\%$
- $CO = 29\%$

Tepkiyenlerin moleküler kütlesi aşağıda verilmiştir;

$$W_{CH_4} = 16 \left[\frac{kg}{Kmol} \right], W_{CO} = 28 \left[\frac{kg}{Kmol} \right], W_{CO_2} = 44 \left[\frac{kg}{Kmol} \right], W_{H_2} = 2 \left[\frac{kg}{Kmol} \right]$$

Kütlesel oran kütlelerin toplam karışım külesine oranıdır;

$$W_i = \frac{m_i}{m_{tot}} = \frac{n_i W_i}{\sum_i n_i W_i} = \frac{X_i W_i}{\sum_i X_i W_i} \quad (7.17)$$

$$\sum_i m_i = m_{top} \quad (7.18)$$

Şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} \sum_i X_i W_i &= X_{CH_4} W_{CH_4} + X_{CO} W_{CO} + X_{CO_2} W_{CO_2} + X_{H_2} W_{H_2} \quad (7.19) \\ &= (0.21 \times 16) + (0.29 \times 28) + (0.38 \times 44) + (0.07 \times 2) = 25.34 kg/kmol \end{aligned}$$

Tepkiyenlerin toplam karışım da kütlesel oranı şu şekilde hesaplanabilir;

$$Y_{CH_4} = \frac{X_{CH_4} W_{CH_4}}{\sum_i X_i W_i} = \frac{0.21 \times 16}{25.34} = 0.1325 \frac{kg_{CH_4}}{kg_{toplam karışım}} \quad (7.20a)$$

$$Y_{CO_2} = \frac{X_{CO_2} W_{CO_2}}{\sum_i X_i W_i} = \frac{0.38 \times 44}{25.34} = 0.6298 \frac{kg_{CH_4}}{kg_{toplam karışım}} \quad (7.20b)$$

$$Y_{CO} = \frac{X_{CO} W_{CO}}{\sum_i X_i W_i} = \frac{0.29 \times 28}{25.34} = 0.3204 \frac{kg_{CH_4}}{kg_{toplam karışım}} \quad (7.20c)$$

$$Y_{H_2} = \frac{X_{H_2} W_{H_2}}{\sum_i X_i W_i} = \frac{0.07 \times 2}{25.34} = 0.00552 \frac{kg_{CH_4}}{kg_{toplam karışım}} \quad (7.20d)$$

Sentetik gazın alt ısıl değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$LVH_{yakıt(SG)} = LVH_{CH_4} \times Y_{CH_4} + LVH_{CO} \times Y_{CO} + LVH_{H_2} \times Y_{H_2} \quad (7.21)$$

$$LVH_{CH_4} = 50000 \text{ kJ/kg}$$

$$LVH_{CO} = 10050 \text{ kJ/kg}$$

$$LVH_{H_2} = 120000 \text{ kJ/kg}$$

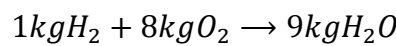
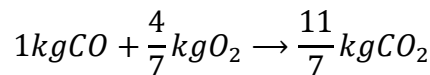
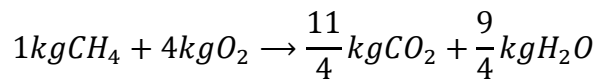
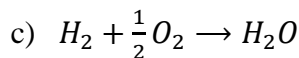
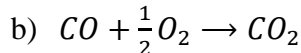
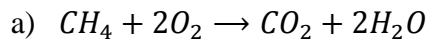
$$\begin{aligned} LVH_{yakıt(SG)} &= (50000 \times 0.1325) + (10050 \times 0.3204) + (120000 \times 0.00552) \\ &= 10507,6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{yakıt(SG)} \times LHV_{yakıt(SG)} \times \eta_{YO} = (\dot{m}_a + \dot{m}_{yakıt(SG)}) \times C_{pa} \times (T_3 - T_5) \quad (7.22)$$

Yakıt kütleli debisi Denklem (7.22)'de yalnız bırakılırsa Denklem (7.23) elde edilir;

$$\begin{aligned} \dot{m}_{yakıt(SG)} &= \frac{\dot{m}_a C_{pa} \times (T_3 - T_5)}{LHV_{yakıt(syngas)} \times \eta_{YO} - C_{pa} \times (T_3 - T_5)} \quad (7.23) \\ \frac{0.7711 \times 1.07 \times (1173 - 782)}{10507,6 \times 0.98 - 1.07 \times (1173 - 782)} &= 0.032655 \text{ kg/dk} \end{aligned}$$

Sentetik gazı kullanıldığı durumda temel yanma reaksiyonları;



$$\frac{Kg O_2}{Kg yakıt} = \frac{1}{0.23} \times \left[4[Y_{CH_4}] + \frac{4}{7}[Y_{CO}] + 8[Y_{H_2}] \right] \quad (7.24)$$

$$\frac{Kg O_2}{Kg yakıt} = \frac{1}{0.23} \times \left[4[0.11856] + \frac{4}{7}[0.28635] + 8[0.00496] \right] = 0.97755$$

$$\frac{Kg O_2}{Kg yakıt} = \frac{1}{0.23} \times \left[\frac{kg O_2}{kg_{SG}} \right] = \frac{0.67755}{0.23} \left[\frac{Kg hava}{Kg yakıt} \right] \Rightarrow \alpha_{st,CH_4} = 2.946 \left[\frac{Kg hava}{Kg yakıt} \right]$$

Birincil alandaki hava/yakıt eşdeğer oranı;

$$\Phi = \frac{\alpha_{st,syngas}}{\alpha} = \frac{\dot{m}_{hava-BB}}{\dot{m}_{yakıt}} = 2 \quad (7.25)$$

$$\alpha = \frac{2.946}{2} = 1.473 \quad (7.26)$$

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{hava-BB}}{\dot{m}_{yakıt}} \rightarrow \dot{m}_{hava-BB} = \alpha \dot{m}_{yakıt} \quad (7.27)$$

$$\dot{m}_{hava-BB} = 1.473 \times 0.032655 = 0.048 \text{ kg/dk} \quad (7.28)$$

$$\dot{m}_{hava-iB} = \dot{m}_{aria} - \dot{m}_{hava-BB} = 0.7711 - 0.048 = 0.7231 \text{ kg/dk} \quad (7.29)$$

Buradan;

$$\begin{aligned} \dot{m}_f &= \dot{m}_{hava-BB} + \dot{m}_{hava-iB} + \dot{m}_{yakıt} \\ &= 0.048 + 0.7231 + 0.032655 = 0.803755 \text{ kg/dk} \end{aligned} \quad (7.30)$$

Tepkiyenlerin kütleli oranı HAD simülasyonları için önemli giriş verisidir ve bu yüzden bulunmalıdır. Hava bileşimi;

$$Y_{O_2} = 0.23, Y_{N_2} = 0.77$$

$$\dot{m}_{O_2} = 0.23 \times 0.048 = 0.01104 \text{ kg/dk} \quad (7.31a)$$

$$\dot{m}_{N_2} = 0.77 \times 0.048 = 0.03696 \text{ kg/dk} \quad (7.31b)$$

Kütleli debi oranları;

$$\dot{m}_{CH_4} = 0.11856 \times 0.032655 = 0.003871 \text{ kg/dk} \quad (7.32a)$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 0.59013 \times 0.032655 = 0.01927 \text{ kg/dk} \quad (7.32b)$$

$$\dot{m}_{CO} = 0.28635 \times 0.032655 = 0.00935 \text{ kg/dk} \quad (7.32c)$$

$$\dot{m}_{H_2} = 0.00496 \times 0.032655 = 0.000162 \text{ kg/dk} \quad (7.32d)$$

Birincil bölgeye giren toplam karışım akış debisi;

$$\dot{m}_{top} = \dot{m}_{yakıt} + \dot{m}_{hava-BB} = 0.032655 + 0.048 = 0.080655 \text{ kg/dk} \quad (7.33)$$

Buradan aşağıdaki denklemlerle karışım tepkiyenlerinin kütleli oranları bulabilmek mümkündür;

$$Y_{O_2} = \frac{X_{O_2}}{\dot{m}_{top}} = \frac{0.01104}{0.080655} = 0.137 \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_{toplam karışım}} \quad (7.34a)$$

$$X_{N_2} = \frac{X_{N_2}}{\dot{m}_{top}} = \frac{0.03696}{0.080655} = 0.4582 \frac{\text{kg}_{N_2}}{\text{kg}_{toplam karışım}} \quad (7.34b)$$

$$Y_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{m}_{top}} = \frac{0.01927}{0.080655} = 0.2389 \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{kg}_{toplam karışım}} \quad (7.34c)$$

$$Y_{CO} = \frac{\dot{m}_{CO}}{\dot{m}_{top}} = \frac{0.00935}{0.080655} = 0.11592 \frac{\text{kg}_{CO}}{\text{kg}_{toplam karışım}} \quad (7.34d)$$

$$Y_{H_2} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\dot{m}_{top}} = \frac{0.000162}{0.080655} = 0.002 \frac{\text{kg}_{H_2}}{\text{kg}_{toplam karışım}} \quad (7.34e)$$

Gerek metan gerekse de sentetik gaz için bulunan kütleli oranlar 2D simülasyonlarda duvar sınırındaki sıcaklıkların bulunabilmesi için kullanıldı. Bununla birlikte 3D simülasyonlarda sınır koşullarında kullanıldı.

7.3. 2D Simülasyon İçin Gereken Hesaplamalar

İki boyutlu simülasyonun yapılması, duvar sıcaklıklarının önceden tahmin edilip üç boyutlu simülasyonlarda sınır koşullarında yerine koymamızı sağlayacaktır. Hava-yakıt karışımının birincil bölgeye girdiği karışım tüplerinin (bütün geometri de 12 tane bulunmaktadır) çıkış kesiti hesaplanır. Böylelikle 2D simülasyon için bu kesitin eşdeğeri oluşturulur. Karışım tüpü çıkış çapı 9 mm'dir.

$$A_{\text{Çıkış}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi 9^2}{4} = 63.617 \text{ mm}^2 \quad (7.35)$$

Yanma odası 12 tane karışım tüpü bulundurduğundan;

$$A_{12,\text{Çıkış}} = 63.617 \times 12 = 763.407 \text{ mm}^2 \quad (7.36)$$

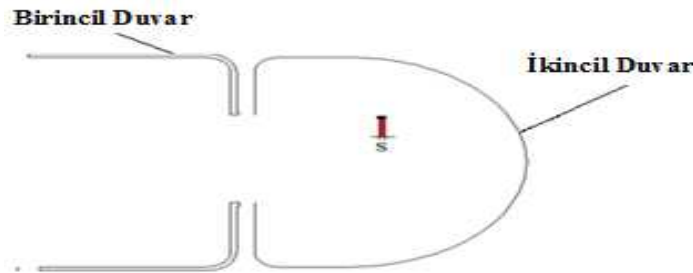
Yanma odasının merkez noktasını merkez kabul eden, karışım tüpü çıkış noktasından geçen bir çember oluşturulur. Bu çemberin çevresi L_C ve yarıçapı r_c 'dir. Yarıçap değeri programda ölçülmüştür ($r_c = 120,8109$).

$$L_C = 2\pi r_c \Rightarrow 2 \times \pi \times 120,8109 = 759 \text{ mm} \quad (7.37)$$

Bu aşama da karışım tüpü çıkış eşdeğerliğini gösteren "S" değeri, iki boyutlu çalışmada karışımın birincil bölgeye geçtiği Şekil 7.1'de gösterilen bölümdür.

$$A_{12,\text{exit}} = A_{\text{eşdeğer}} = L_C \times S \quad (7.38)$$

$$763.407 = 120.8109 \times S \Rightarrow S = 1.005806 \text{ mm}$$



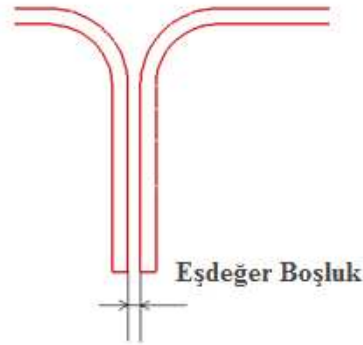
Şekil 7.1. 2D geometrinin şematik gösterimi

Uygun geometri ve hesaplanan kütle oranlarla 2D simülasyonları sıcaklıkların tayin edilebilmesi için Fluent 6.3 programında gerçekleştirilmiştir. Bu veriler yanma simülasyonları sırasında daha doğru ısı transfer ve daha iyi sonuçlar elde edebilmek için gereklidir.

İkincil bölümdeki hava kanallarının bulunduğu alanın da eşdeğer hesaplaması yapılmalıdır. Böylece bu kanalların iyi bir şekilde yerleştirilebilmesi gerçekleştirilmiş olur.

$$S_{eşdeğer} = \frac{a \times b \times N_{delik}}{2\pi R} \quad (7.39)$$

Denklem (7.39)'da a ve b dikdörtgen boyutlarını, delik sayısını N_{delik} , çemberin yarıçapını R temsil etmektedir.



Şekil 7.2. İkincil hava kanalı eşdeğer boşluğu

Uygun ısı transfer modeli, tepkiyen kütle oranları ve kütle debisi seçilerek simülasyon Fluent 2ddp programında çalıştırılmıştır. Tablo 7.1. bu simülasyonlardan elde edilen birinci ve ikinci duvar sınır şartlarındaki sıcaklık değerlerini farklı yüklemeler altında göstermektedir.

Tablo 7.1. Birincil ve ikincil duvar şartlarındaki sıcaklık değerleri

Güç [kW]	10	20	30	40	50	60	70	80
Birincil Duvar Sıcaklığı [K]	790.321	823.999	823.99	1017.89	1031.64	1046.80	1137.33	1150.31
İkincil Duvar Sıcaklığı [K]	600.637	623.142	623.15	748.835	757.246	770.528	826.873	841.617

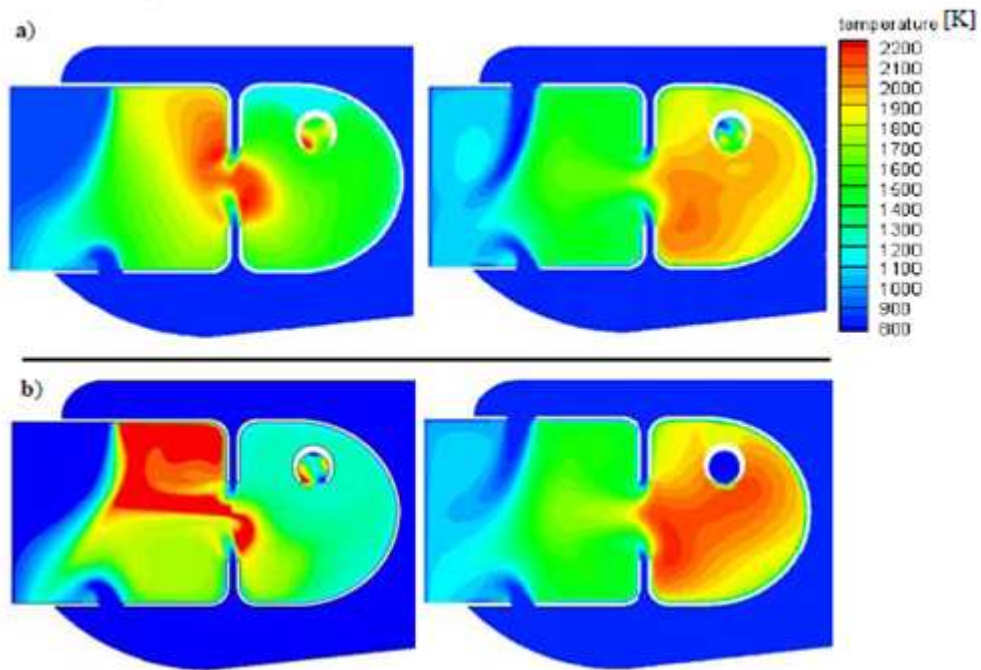
Bu tahmini sıcaklık değerleri 3D simülasyonlarında metan ve sentetik gazın yakıt olarak kullanımı sırasında duvar sıcaklık sınır koşullarında kullanılmıştır.

BÖLÜM 8

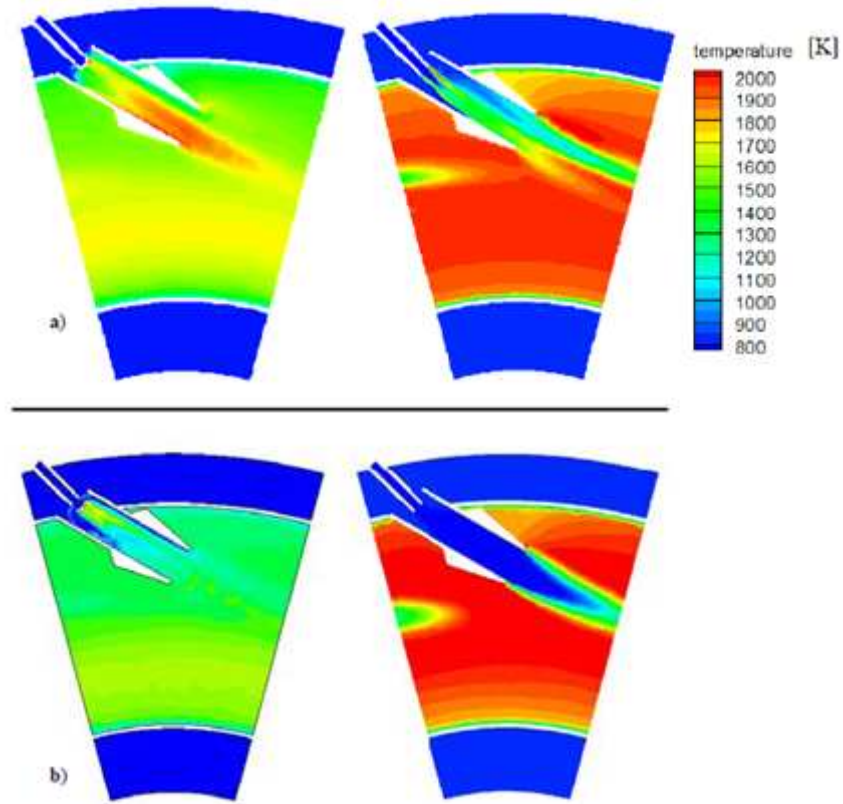
HAD SAYISAL MODELLEME SONUÇLARI

8.1. Sonuçlar ve Karşılaştırmalar

Bu bölümde SG ve metan için elde edilmiş HAD simülasyonu sonuçları verilmiştir. Şekil 8.1 ve Şekil 8.2 tam yüklemde farklı yanma modelleri kullanılarak elde edilen sıcaklık değerlerini iki farklı kesit şekillerini göstermektedir. Birinci bölümde SG sıcaklık değerleri metan sıcaklık değerlerinden daha geniş değere ulaşmaktadır. Buna rağmen ikinci bölümde metan sıcaklığı SG değerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Ulaşılan maksimum sıcaklık değeri metan-hava karışımı için ikinci bölümde 2200 K, SG-hava karışımı için birinci bölümde 2050 K olarak kaydedilmiştir.



Şekil 8.1. Sıcaklık dağılımının (x-y) düzleminde görünümü
a) Flamelet-GRI; b) ED-FR J.&L. (metan-solda,SG-sağda)

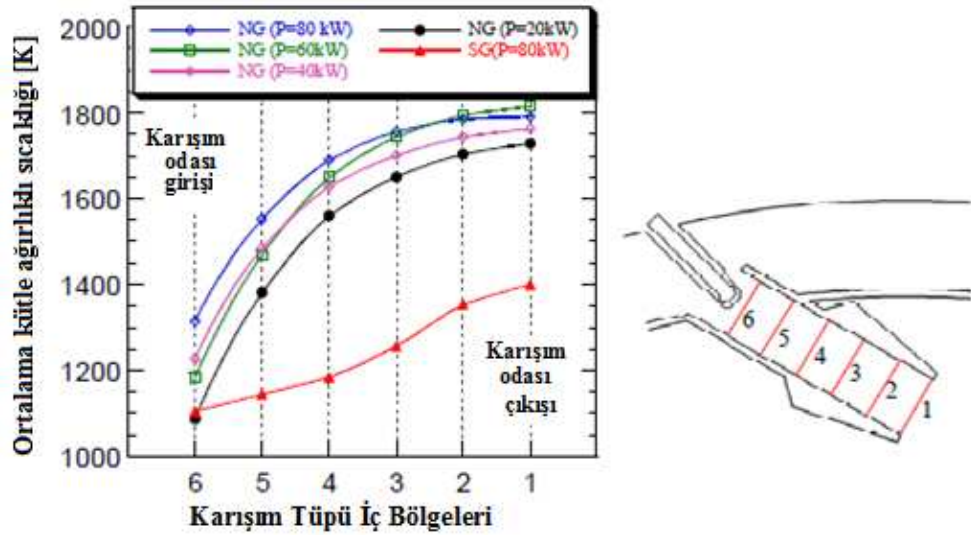


Şekil 8.2. Sıcaklık dağılımının karışım tüpü kesitinde görünümü
a) Flamelet-GRI; b) ED-FR J.&L. (metan-solda,SG-sağda)

Şekil 8.2. flamelet modelinin metan ve SG kullanımı durumunda karışım tüpü içinde daha geniş ölçüde yerel sıcaklık değerlerini aldığını göstermektedir. Şekil 8.3 karışım tüpü içerisinde flamelet modeli ile hesaplanan farklı bölgelerindeki kütle ağırlıklı ortalama sıcaklık değerlerini göstermektedir. Ayrıca metan için farklı yüklemeler altında sıcaklık değerleri de verilmiştir. SG yanması sırasında alevin karışım tüpünden daha uzağa hareket etmesini ve böylece birincil alandaki sıcaklığın daha fazla olmasının kanıtıdır. Bu sonuç muhtemelen birincil alan hava/yakıt karışım oranının (SG çalışmasında daha az) ve akış-alan (geniş akış debisi) değişikliğinden kaynaklanmaktadır. Doğal gaz kullanıldığı durumda, MGT yüklemeye azaltılmasına bağlı olarak karışım tüpünde ortalama sıcaklık değerlerinin azaldığı görülebilmektedir.

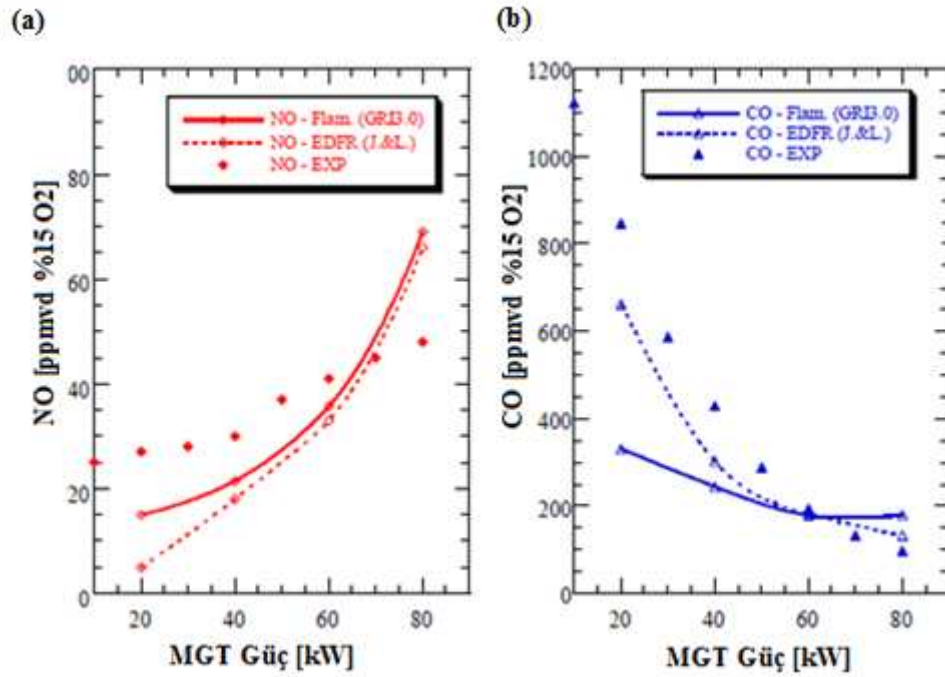
Metan gazı kullanıldığı durumda yanma odası çıkışındaki hesaplanmış CO ve NO emisyonları ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 8.4'de gösterilmiştir.

Hesaplamalar flamelet GRI3.0 yanma modelinde, kirlilik yaratan ürünlerin kütle oranını daha doğru hesaplayan durgun ve sabit olmayan flamelet formülasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar deneysel verilerle aynı çizgide, MGT yükleme artışı ile NO emisyonunun artış eğiliminde olduğu, buna karşın CO emisyonunun düşmekte olduğu gözlenmiştir.



Şekil 8.3. Karışım tüpünün farklı bölgelerindeki ortalama sıcaklık değerleri

Tam yüklemde CO emisyonu az bir sapma ile deneysel veri ile eşleşmektedir. CO kısmi-yükleme ED-FR HAD simülasyonları deneysel verilerle iyi bir şekilde eşleşmektedir fakat flamelet sonuçları deneysel verilerle tam örtüşmediği görülebilmektedir. Buna karşın NO konsantrasyon öngörüsü Flamelet GRI 3.0 yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen kısmi-yükleme sırasında, ED-FR Jones & Lindstedt yaklaşımına göre deneysel verilere daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.



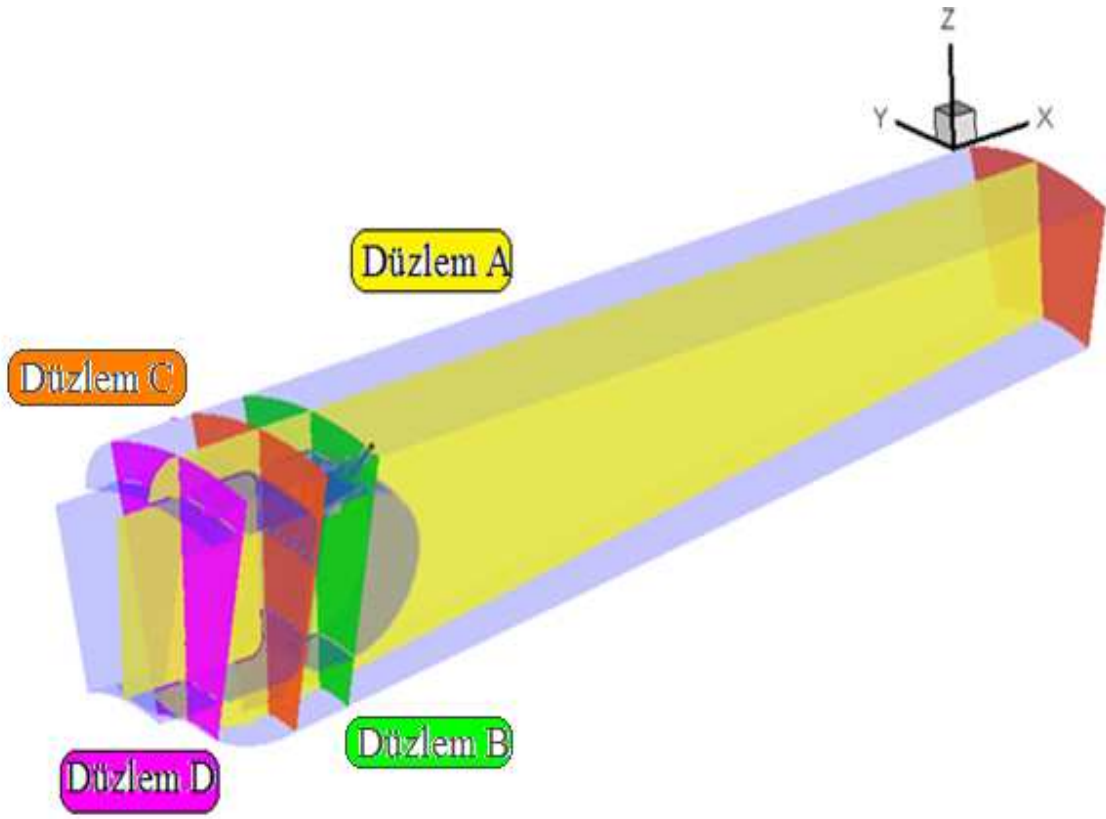
Şekil 8.4. MGT yüklemesine karşın HAD ve deneysel NO ve CO emisyonları (Metan-hava yanması)

Tablo 8.1. tam yükleme sırasında hesaplanmış metan ve SG emisyonlarını göstermektedir. Termal yükleme ve yanma ortalama çıkış sıcaklığı eşit olsa bile, SG çalışmasında CO ve NO_x emisyonları azalma eğilimindedir. SG çalışmasında ED-FR modeli çok düşük CO değerine ulaşmaktadır ve flamelet modeli ile uyuşmamaktadır.

Tablo 8.1. MGT tam yükleme sırasında hesaplanmış çıkış konsantrasyonları

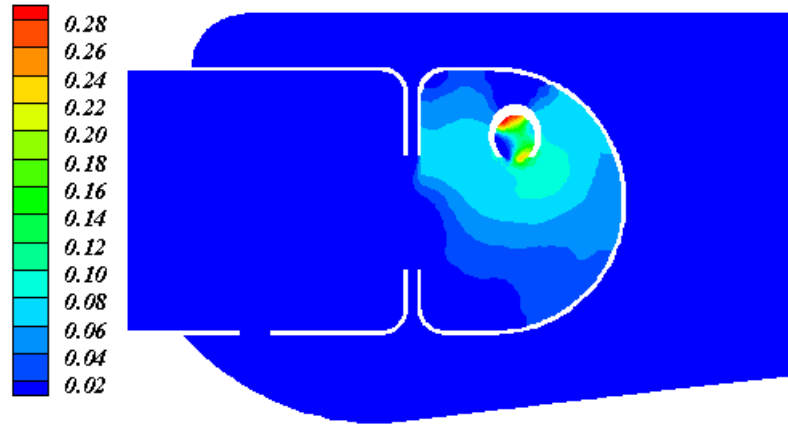
Tam yüklü MGT çıkışındaki değerler	Yakıt : CH ₄ Flamelet GRI 3.0	Yakıt: CH ₄ ED-FR J.& L.	Yakıt : SG Flamelet GRI 3.0	Yakıt: SG ED-FR J.&L.
CO [ppm 15%O ₂]	180	133	59	1
CO ₂ [%vol]	1.4	1.4	4.1	4.5
No [ppm 15%O ₂]	69	66	3.5	5.4
O ₂ [%vol]	17.9	18.4	17.7	16.9
H ₂ O [%vol]	2.8	3.0	2.2	2.5
T [K]	1105	1119	1085	1089

8.2. İlgili Düzlemlerdeki Sonuçların Görselleştirilmesi

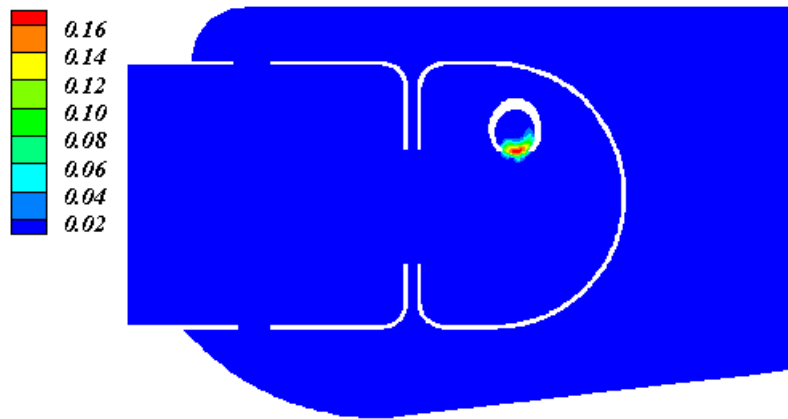


Şekil 8.5. Sonuçların incelenebilmesi için oluşturulan düzlemlerin görünümü

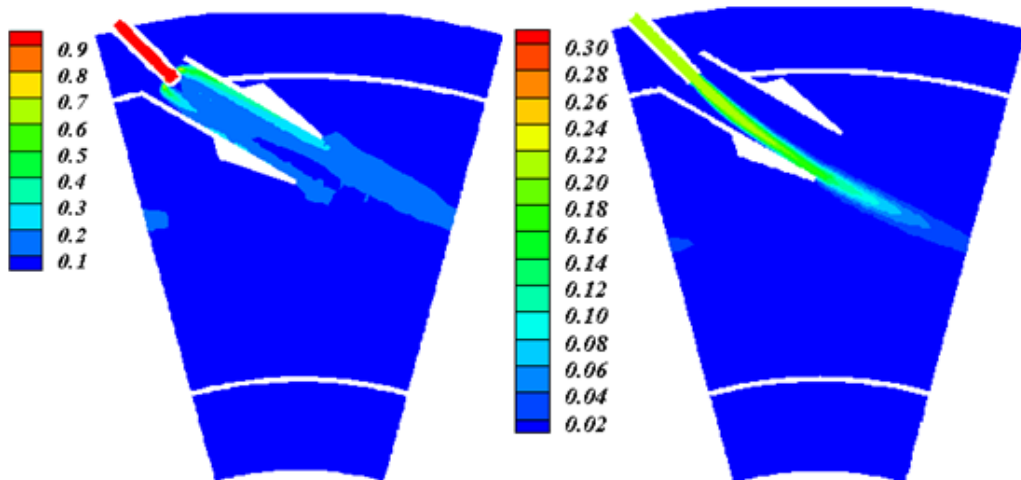
Şekil 8.5’de CH_4 , CO_2 ve CO kütle oranları, sıcaklık ve hız dağılımlarının incelenmesi ve gözlemlenebilmesi için oluşturulmuş dört düzlem renkli olarak resmedilmiş. Bu düzlemler, x-z aksiyal düzlem (sarı), y-z karışım düzlemi (yeşil), y-z ikincil hava karışım düzlemi (turuncu) ve y-z seyreltme hava kanal düzlemi (pembe) olarak oluşturulmuştur. Sonuçlar SG ve metan için belirtilen düzlemlerde ilerleyen kısımda sunulmaktadır. Şekil 8.6-9’da A, B, C düzlemlerinde CH_4 kütle oranını gösterilmektedir.



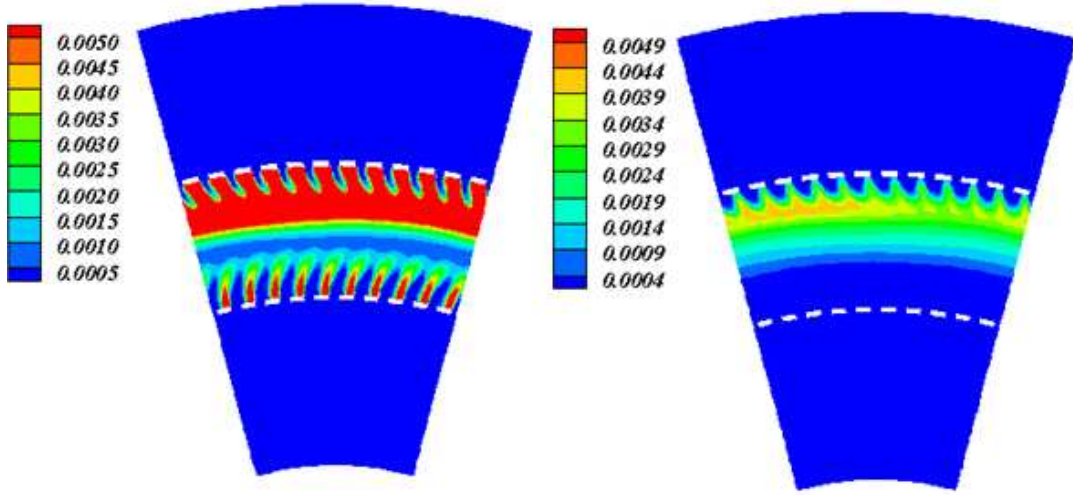
Şekil 8.6. Metan çalışmasında CH_4 kütle oranı (düzlem A)



Şekil 8.7. SG çalışmasında CH_4 kütle oranı (düzlem A)

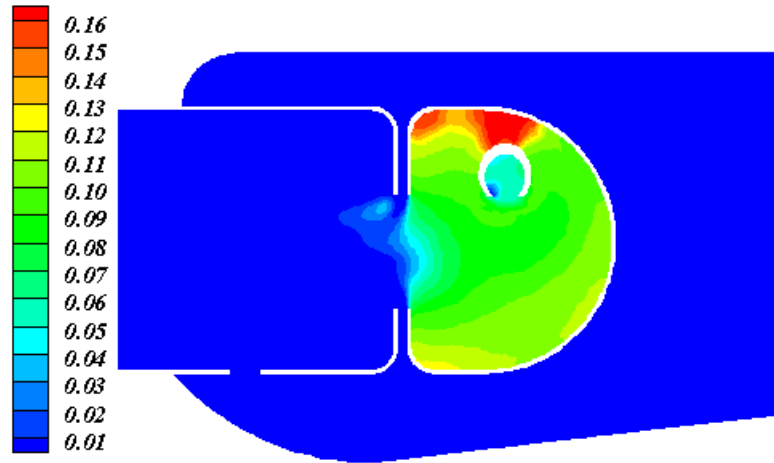


Şekil 8.8. CH_4 kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)

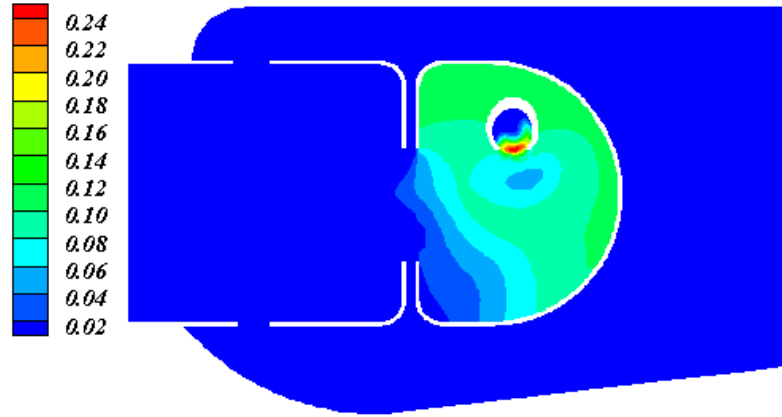


Şekil 8.9. CH_4 kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)

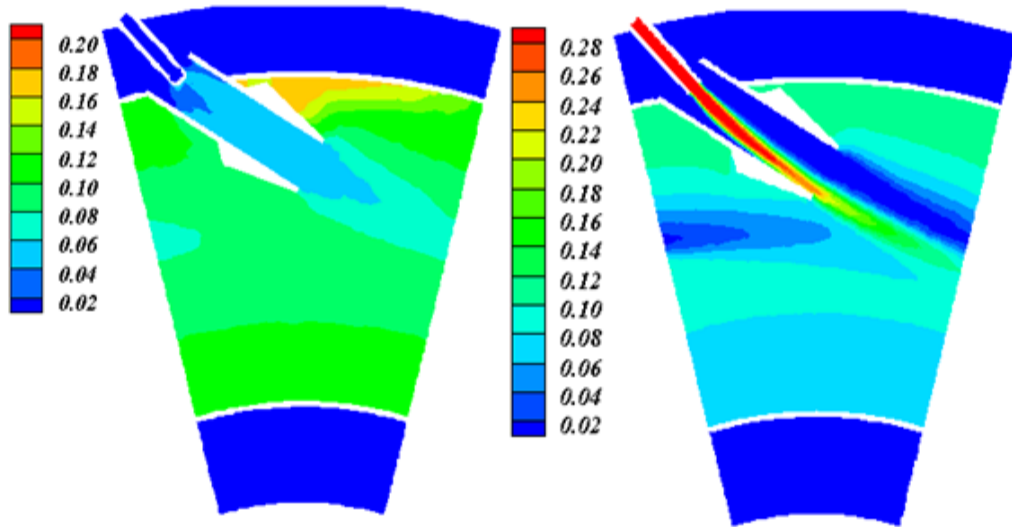
CO kütle oranı Şekil 8.10-13'de A, B, C düzlemlerinde gösterilmiştir.



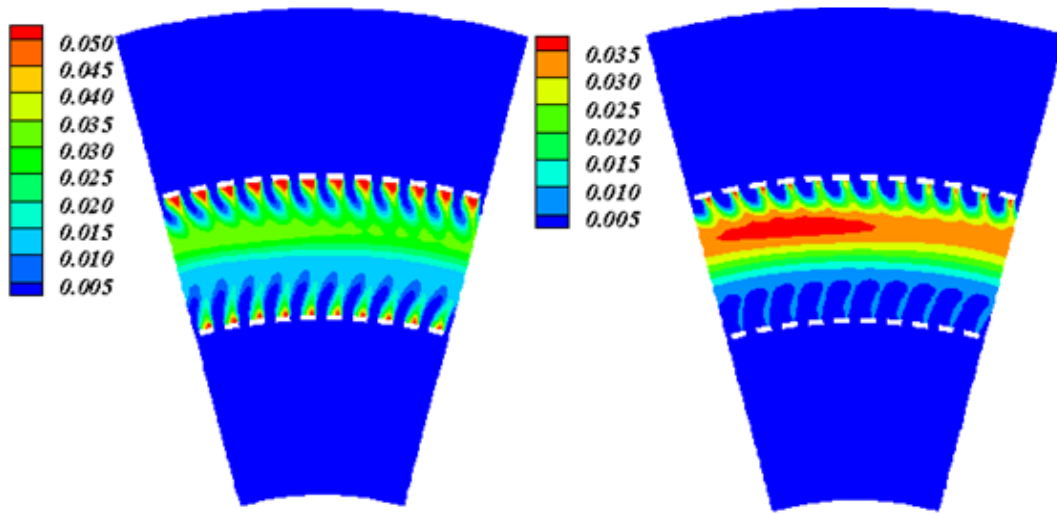
Şekil 8.10. Metan çalışmasında CO kütle oranı (düzlem A)



Şekil 8.11 SG çalışmasında CO kütle oranı (düzlem A)

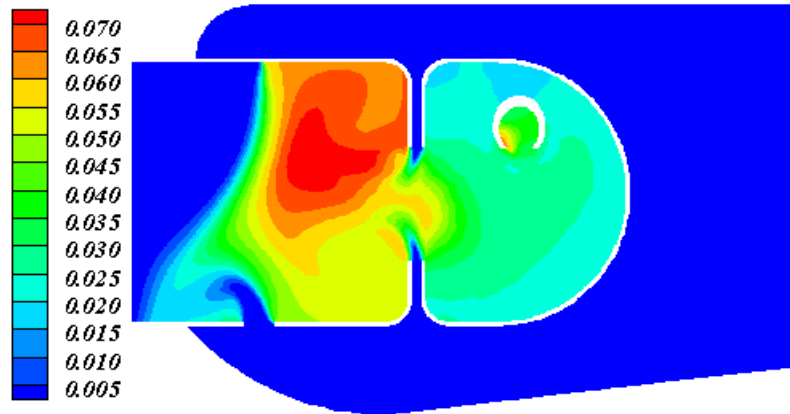


Şekil 8.12. CO kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)

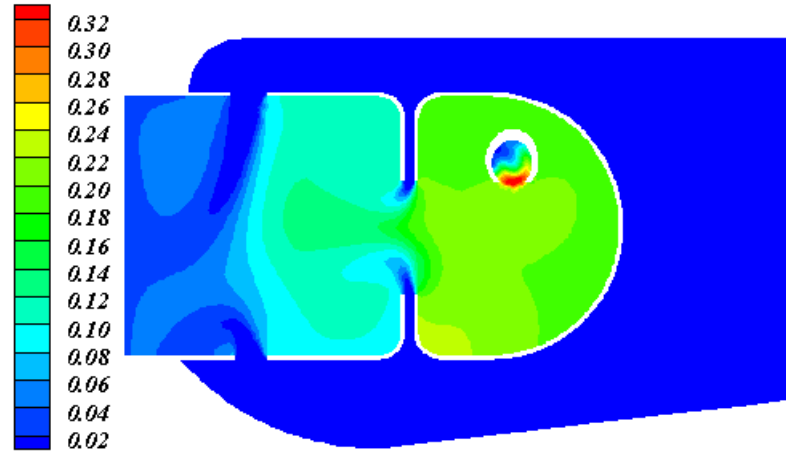


Şekil 8.13. CO kütle oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)

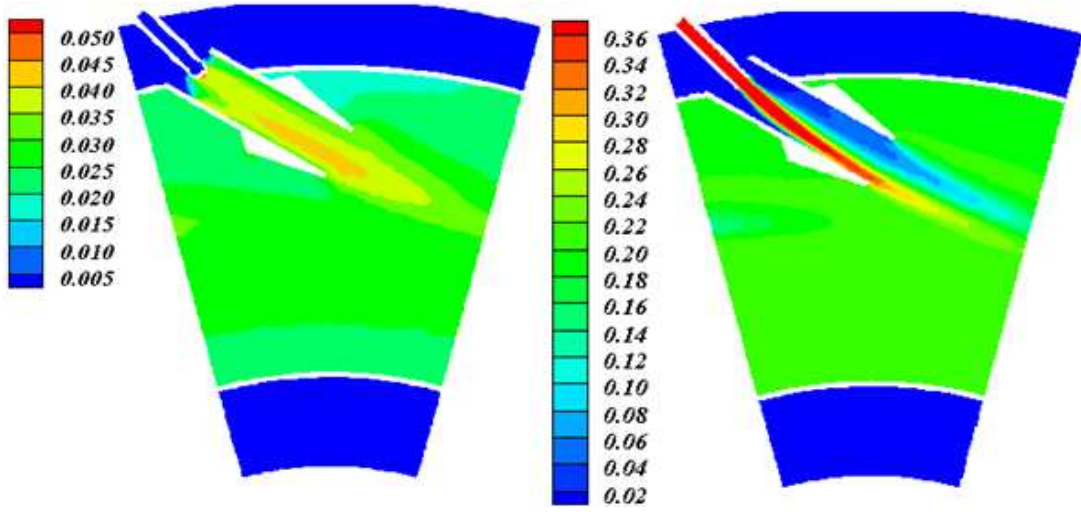
CO_2 Kütle oranı Şekil 8.14-17'de A, B, C düzlemlerinde gösterilmiştir.



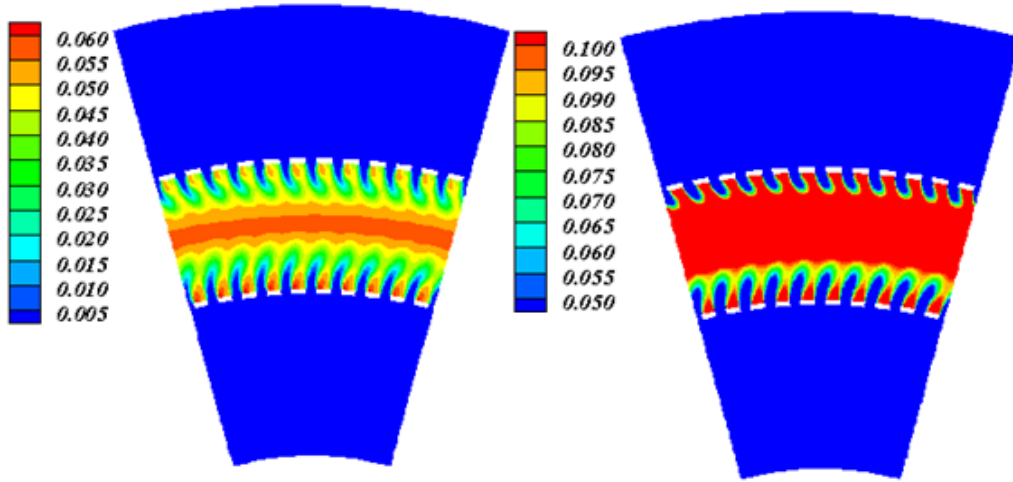
Şekil 8.14. Metan çalışmasında CO_2 kütle oranı (düzlem A)



Şekil 8.15. SG çalışmasında CO_2 kütlelesel oranı (düzlem A)

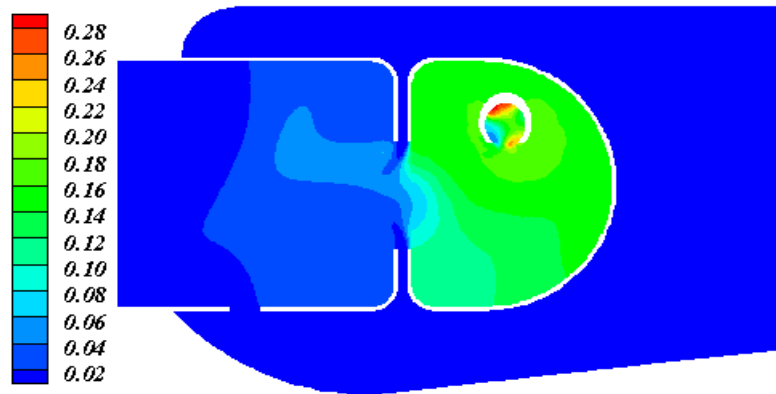


Şekil 8.16. CO_2 kütlelesel oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)

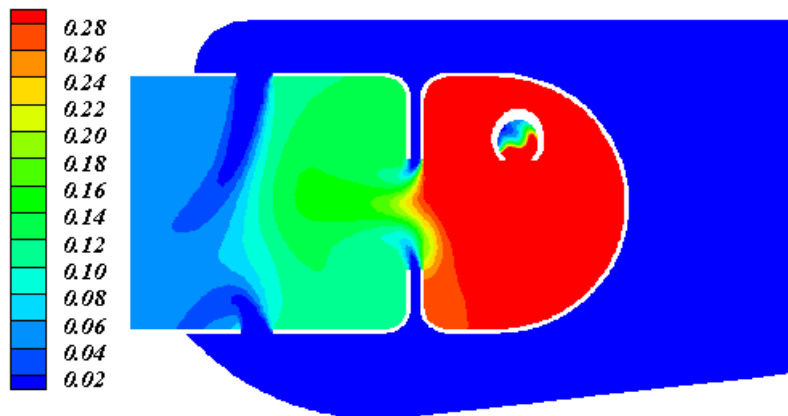


Şekil 8.17. CO_2 kütleli oranı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)

Ortalama kesrin görünümü Şekil 8.18-19'de A düzleminde gösterilmiştir.

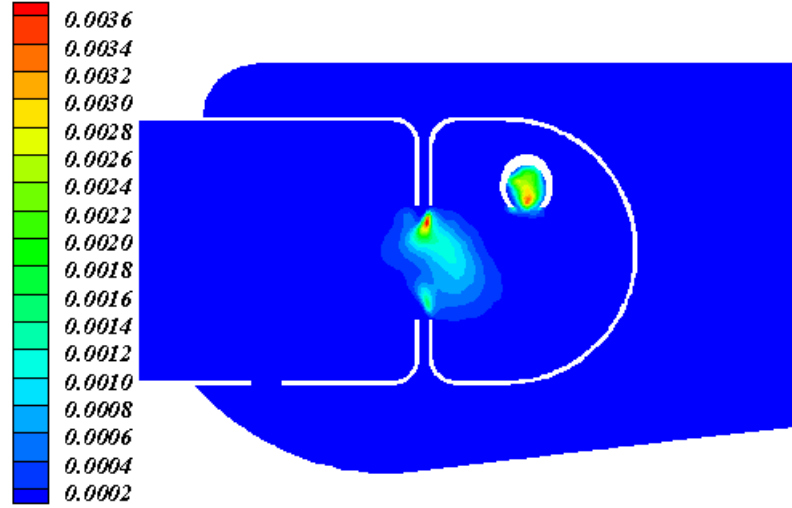


Şekil 8.18. Metan çalışmasında ortalama kesir görünümü (düzlem A)

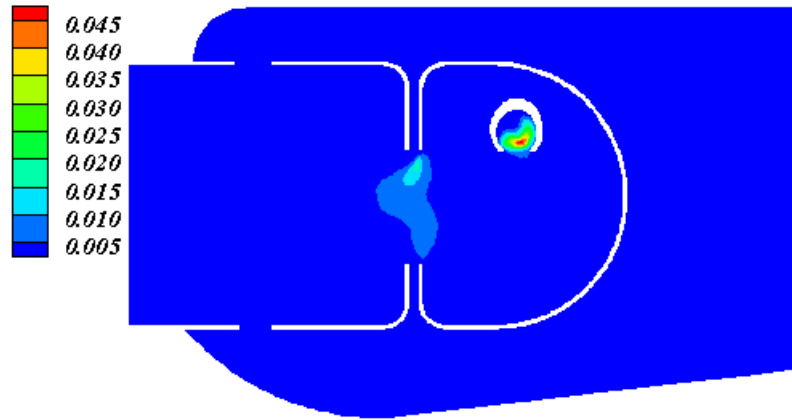


Şekil 8.19. SG çalışmasında ortalama kesir görünümü (düzlem A)

Ortalama kesir değişkeni Şekil 8.20-21’de A düzleminde gösterilmiştir.



Şekil 8.20. Metan çalışmasında ortalama kesir değişkeni (düzlem A)

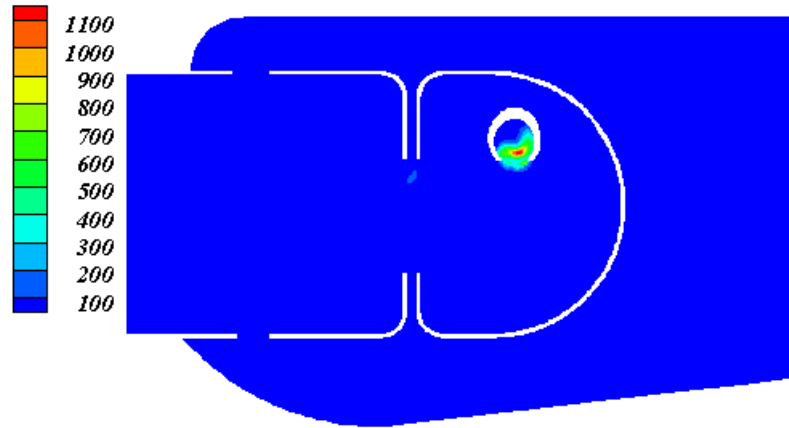


Şekil 8.21. SG çalışmasında ortalama kesir değişkeni (düzlem A)

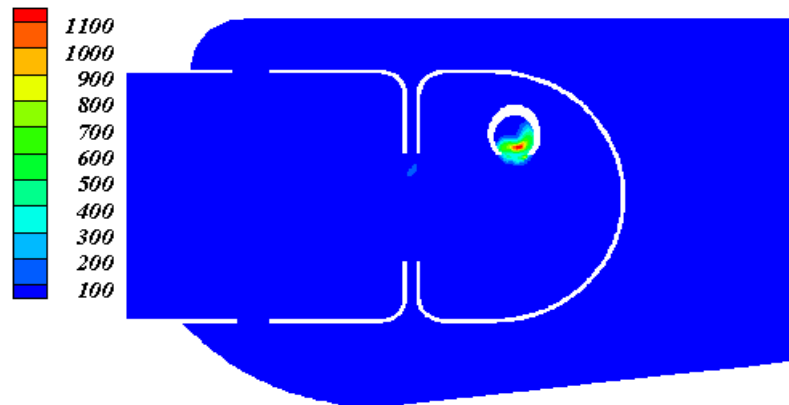
Skalar kayıp A düzleminde Şekil 8.22-23’de gösterilmiştir. Skalar kayıp teoride ve yanmayı modellemede ayrıca diğer turbülans akış reaksiyonlarının modellenmesinde çok önemli bir yere sahiptir. Skalar kayıp hesabı, korunum denklemlerinden kalite eksikliği ile bulunur. Skalar kaybın şartlı ortalaması, akış ve karışım koşullarına bağlı nicelik ve nitelik bağımlılıklarına sahiptir, akış modellemesi ve teorisi için önemlidir(Fluent 2006) Skalar kayıp şu şekilde tanımlanır;

$$\chi = 2D |\nabla f|^2 \quad (7.1)$$

Bu denklemde D yayılım katsayısını göstermektedir. Skalar kayıp oranının χ , alev aksisi boyunca değişken olduğu not edilmelidir.

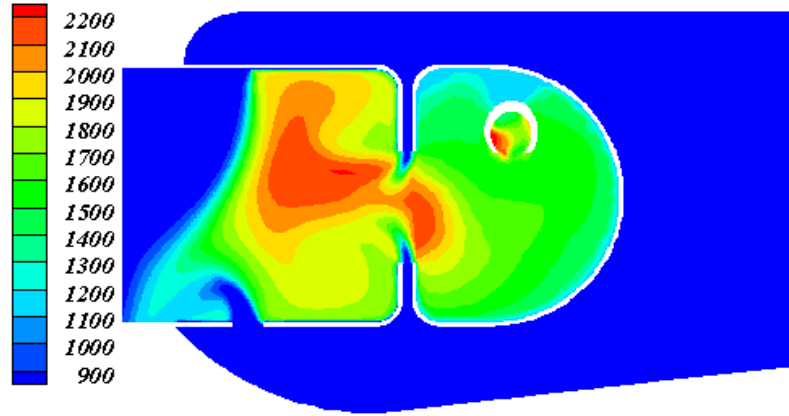


Şekil 8.22. Metan çalışmasında skalar kayıp oranı (düzlem A)

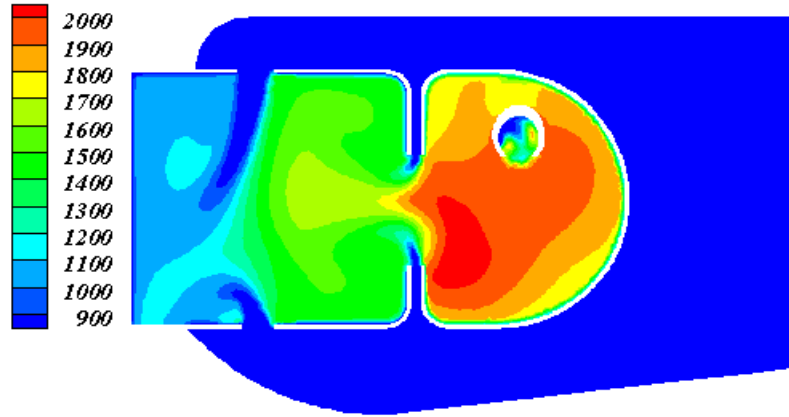


Şekil 8.23. SG çalışmasında Skalar kayıp oranı (düzlem A)

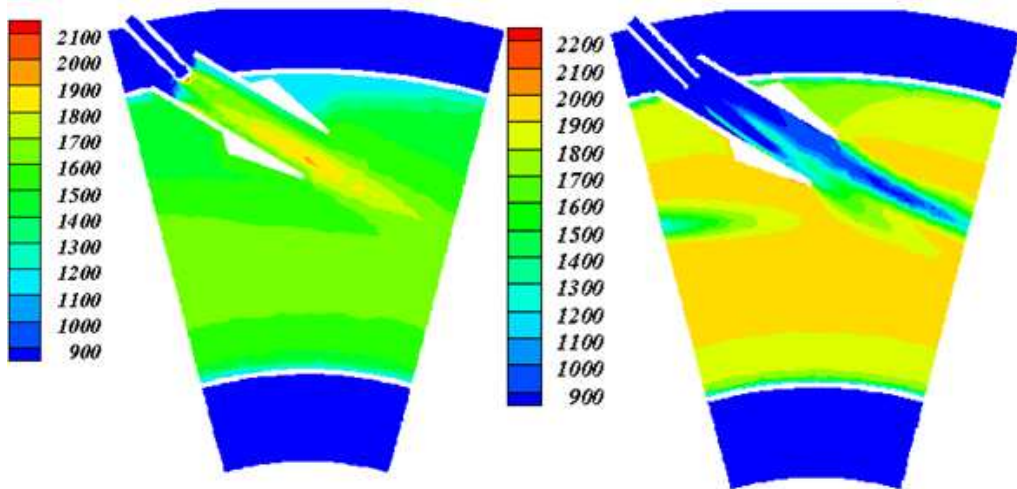
Sıcaklık dağılımı Şekil 8.24-28'de A, B, C,D düzlemlerinde gösterilmiştir.



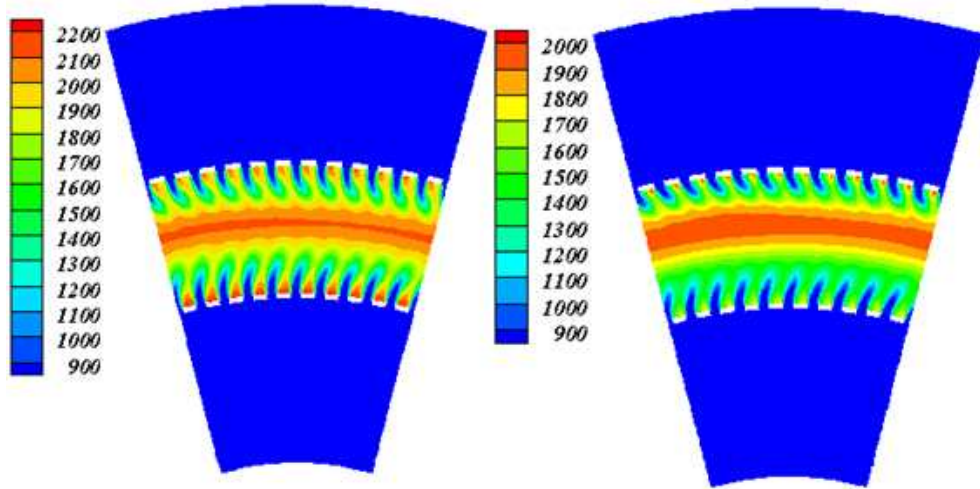
Şekil 8.24. Metan çalışmasında sıcaklık dağılımı (düzlem A)



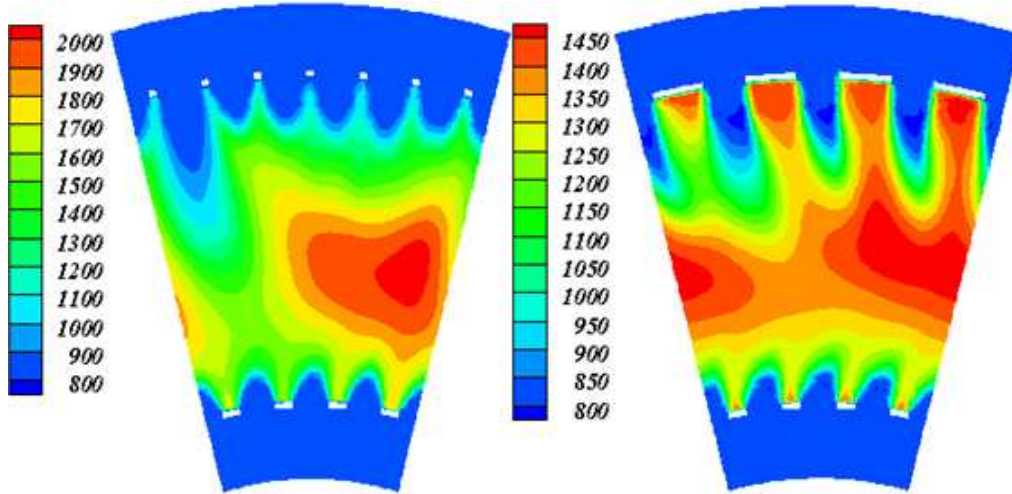
Şekil 8.25. SG çalışmasında sıcaklık dağılımı (düzlem A)



Şekil 8.26. Sıcaklık dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)

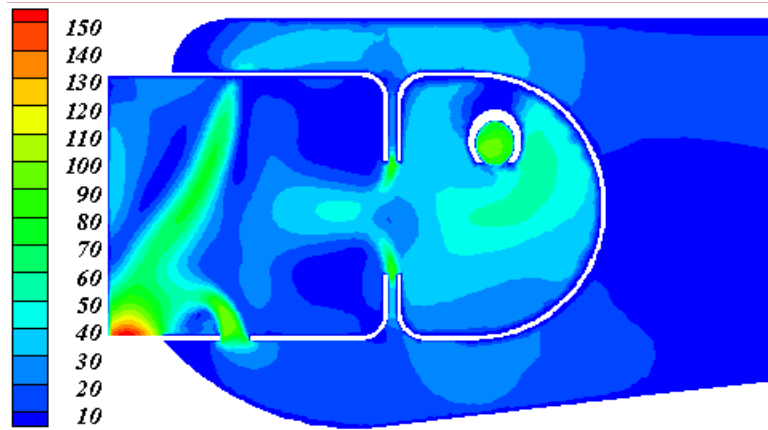


Şekil 8.27. Sıcaklık dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)

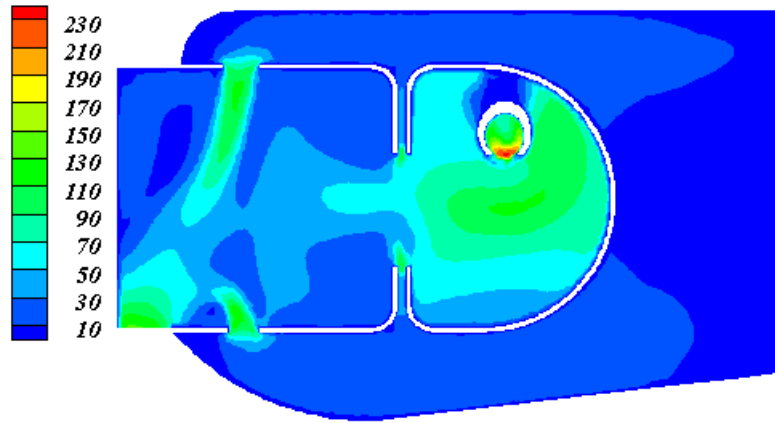


Şekil 8.28. Sıcaklık dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem D)

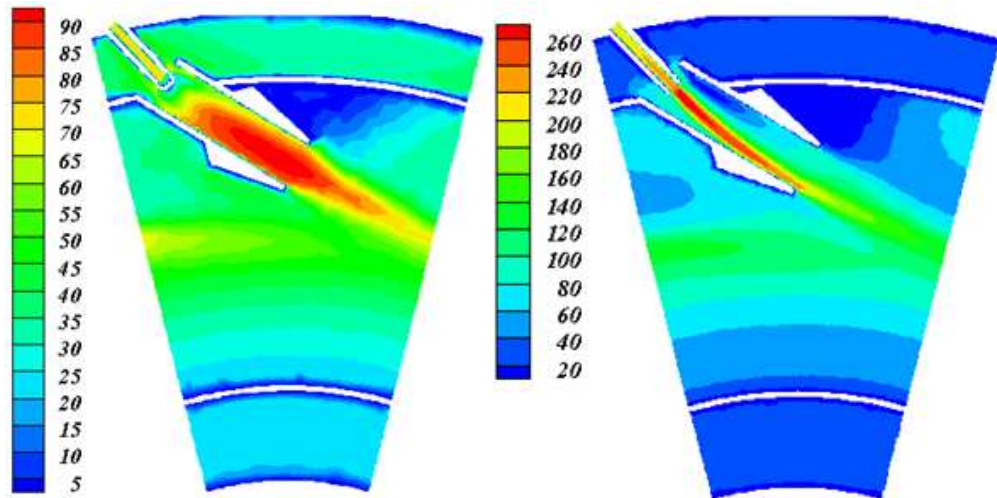
Hız dağılımı Şekil 8.29-33'de A, B, C,D düzlemlerinde gösterilmiştir.



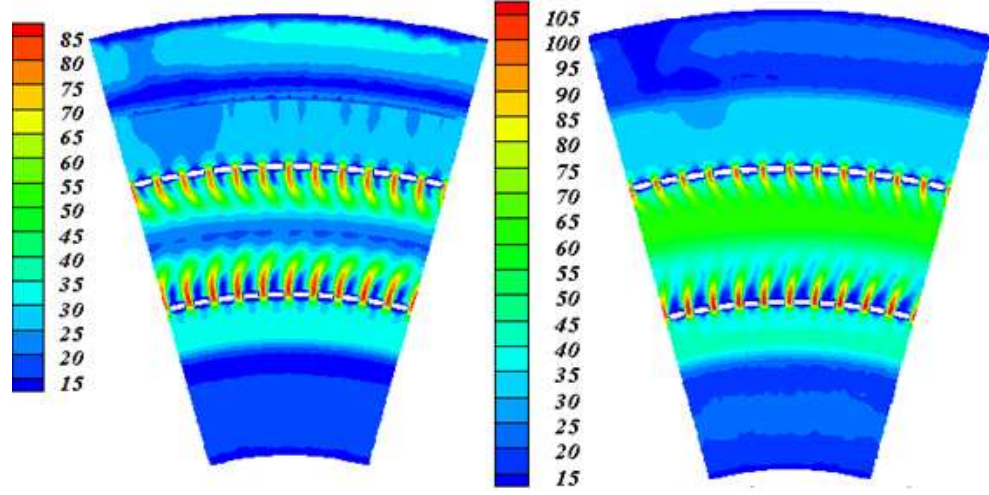
Şekil 8.29. Metan çalışmasında hız dağılımı (düzlem A)



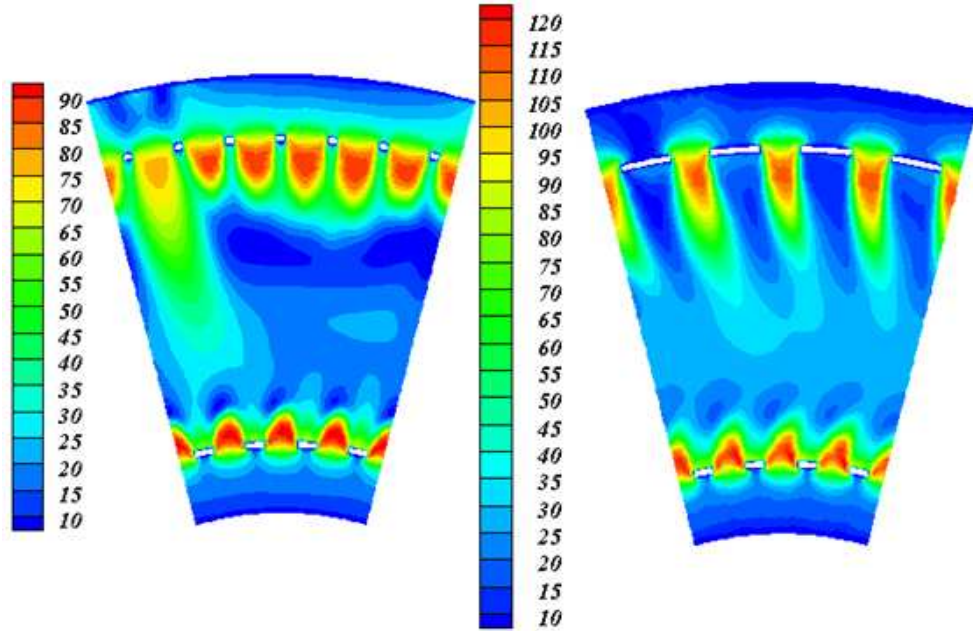
Şekil 8.30. SG çalışmasında hız dağılımı (düzlem A)



Şekil 8.31. Hız dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem B)



Şekil 8.32. Hız dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem C)



Şekil 8.33. Hız dağılımı (Sol: Metan, Sağ: SG, düzlem D)

BÖLÜM 9

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada mikro türbin üzerine araştırması yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları, birkaç ilginç sonuç göstermiştir. İlk olarak analizler, RANS metotlarının ve hatta en basit modellerinin metan kullanımı durumunda ısı yayılım bölgelerinin ve düzgün NO_x emisyon sonuçlarının elde edilebildiğini ortaya koymuştur. Referans çalışması olan metan kullanımı sırasında, deneysel verilerle ticari HAD aracı sonuçlarının iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu çalışmada sentetik gaz kullanımında yanma odasında gerçekleşen olayların nasıl bir tutum içinde olduğunu aydınlatmak için gerçekleştirilen HAD simülasyonu çalışması, daha iyi bir yanma modeli geliştirilmesine ve geçerli kılınmasına ihtiyaç duymaktadır.

Düşük ısı değerli gaz kullanımına bağlı olarak alevin yakıt nozuluna doğru yön değiştirdiği görülmüştür. İki reaksiyon alanlı zengin karışım- soğutma- fakir karışım yanma odası konsepti, sentetik yakıt için uygundur fakat gerçek emisyon değerlerine ulaşabilmek için daha kapsamlı bir araştırma gerekmektedir.

Bu çalışma, MGT'de piroliz edilmiş gazın kullanımı için deneysel ve nümerik sonuçlar sağlamıştır. Yanma odası, iç termal akış alanı genel bir sıcaklık dağılımı ve çıkışta kirletici emisyon dağılımına maruz kalmaktadır. Sentetik gaz kullanımı için düzgün yanma modelinin ve kimyasal mekanizmanın seçilmesi gerektiğinin tekrar altı çizilmelidir.

Sıcaklık dağılımına bakarak alevin birinci bölgede başarıyla tutulduğunu ve alev uzamasının görülmediğini söyleyebiliriz. Ayrıca yeterli hava karışım oranının birincil ve ikincil bölgelerde sağlandığı görülmektedir. Bu sayede soğutma işlemi de başarılı bir şekilde gerçekleşmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aras, H., Balli, O., 2007, Energetic and exergetic performance evaluation of a combined heat and power system with the micro gas turbine (MGTCHP), *International Journal of Energy Research*, Volume 31, Issue 14, 1425–1440p.
- Blazek, J., 2001, *Computational fluid dynamics: Principles and applications*, Alstom Power Ltd., Baden-Daettwil, Switzerland
- Brink, A., Mueller, C., Kilpinen, P. and Hupa, M., 2000, “Possibilities and limitations of the Eddy break-up model”, *Combustion and flame* 123, 275–279p.
- Çengel, Y.A. and Boles., M.A., 2005, *Thermodynamics: An engineering approach*, 792, 407-517p.
- Delattin, F., Rizzo, S., Bram, S., Lorenzo, G. and Ruyck, J., 2009, *Combustion of syngas in a pressurized micro turbine-like combustor: Experimental results*, 12p.
- Fantozzi, F., De Pascale, A., Fussi, M., Laranci, P., Peretto, A., 2010, *Experimental and numerical analysis of natural gas and pyrolysis syngas combustion in a microturbine combustor*
- FLUENT user guide, 2006, FLUENT INC.
- Gottlieb, D. and Orszag, Steven, A., 1995, *The Numerical analysis of spectral methods: Theory and applications*, 1-8p.
- Jones, W.P. and Lindstedt, R.P., 1988, *Global reaction schemes for hydrocarbon combustion*, *Combustion Flame* 73, 233-249p.
- Karakas, E., Karl, J., Karellas, S., 2006, *An innovative biomass gasification process and its coupling with micro turbine and fuel cell systems*
- Karakoç T.H., 2006, *DGT (Doğal Gaz Tesisatı)*, *DemirDöküm Teknik Yayınları*
- Malalasekera, W. and Versteeg, H.K., 1995, *An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method*, Longman Group, 257p.
- McDonald, C.F. and Rodgers, C., 2007, *Small recuperated ceramic micro turbine demonstrator concept*
- Mongia, H., Krishnaswami, S., ve Sreedhar, P., 2007, *Comprehensive gas turbine combustion modeling methodology*

Pilavachi, P.A., 2000, Power generation with gas turbine systems and combined heat and power, *Appl. Therm. Eng.*, 1421–1429p.

Riesmeier, E., Honnet, S. and Peters, N., 2004, Flamelet modeling of pollutant formation in a gas turbine combustion chamber using detailed chemistry for a kerosene model fuel

Soares, C., 2007, *Microturbines, Applications for distributed energy systems*, Oxford: Elsevier, 271p.

Zingg, D.W., 1999, *Fundamentals of computational fluid dynamics*, University of Toronto Institute for Aerospace Studies, 275, 71-80p.

www.powermems.be/gasturbine.html

www.capstoneturbine.com/

EK A

GRI 3.0 KİMYASAL YANMA MEKANİZMASI

! GRI-Mech Version 3.0 7/30/99 CHEMKIN-II format
! See README30 file at anonymous FTP site unix.sri.com, directory gri;

! WorldWideWeb home page http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/ or
! through <http://www.gri.org>, under 'Basic Research',
! for additional information, contacts, and disclaimer

ELEMENTS

O H C N AR

END

SPECIES

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

END

!THERMO

! Insert GRI-Mech thermodynamics here or use in default file

!END

REACTIONS

2O+M<=>O2+M	1.200E+17	-1.000	.00
H2/ 2.40/ H2O/15.40/ CH4/ 2.00/ CO/ 1.75/ CO2/ 3.60/ C2H6/ 3.00/ AR/ .83/			
O+H+M<=>OH+M	5.000E+17	-1.000	.00
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
O+H2<=>H+OH	3.870E+04	2.700	6260.00
O+HO2<=>OH+O2	2.000E+13	.000	.00
O+H2O2<=>OH+HO2	9.630E+06	2.000	4000.00
O+CH<=>H+CO	5.700E+13	.000	.00
O+CH2<=>H+HCO	8.000E+13	.000	.00
O+CH2(S)<=>H2+CO	1.500E+13	.000	.00
O+CH2(S)<=>H+HCO	1.500E+13	.000	.00
O+CH3<=>H+CH2O	5.060E+13	.000	.00
O+CH4<=>OH+CH3	1.020E+09	1.500	8600.00
O+CO(+M)<=>CO2(+M)	1.800E+10	.000	2385.00
LOW/ 6.020E+14 .000 3000.00/			
H2/2.00/ O2/6.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/3.50/ C2H6/3.00/ AR/ .50/			
O+HCO<=>OH+CO	3.000E+13	.000	.00
O+HCO<=>H+CO2	3.000E+13	.000	.00
O+CH2O<=>OH+HCO	3.900E+13	.000	3540.00
O+CH2OH<=>OH+CH2O	1.000E+13	.000	.00
O+CH3O<=>OH+CH2O	1.000E+13	.000	.00
O+CH3OH<=>OH+CH2OH	3.880E+05	2.500	3100.00
O+CH3OH<=>OH+CH3O	1.300E+05	2.500	5000.00
O+C2H<=>CH+CO	5.000E+13	.000	.00
O+C2H2<=>H+HCCO	1.350E+07	2.000	1900.00
O+C2H2<=>OH+C2H	4.600E+19	-1.410	28950.00
O+C2H2<=>CO+CH2	6.940E+06	2.000	1900.00

O+C2H3<=>H+CH2CO	3.000E+13	.000	.00
O+C2H4<=>CH3+HCO	1.250E+07	1.830	220.00
O+C2H5<=>CH3+CH2O	2.240E+13	.000	.00
O+C2H6<=>OH+C2H5	8.980E+07	1.920	5690.00
O+HCCO<=>H+2CO	1.000E+14	.000	.00
O+CH2CO<=>OH+HCCO	1.000E+13	.000	8000.00
O+CH2CO<=>CH2+CO2	1.750E+12	.000	1350.00
O2+CO<=>O+CO2	2.500E+12	.000	47800.00
O2+CH2O<=>HO2+HCO	1.000E+14	.000	40000.00
H+O2+M<=>HO2+M	2.800E+18	-.860	.00
O2/ .00/ H2O/ .00/ CO/ .75/ CO2/1.50/ C2H6/1.50/ N2/ .00/ AR/ .00/			
H+2O2<=>HO2+O2	2.080E+19	-1.240	.00
H+O2+H2O<=>HO2+H2O	11.26E+18	-.760	.00
H+O2+N2<=>HO2+N2	2.600E+19	-1.240	.00
H+O2+AR<=>HO2+AR	7.000E+17	-.800	.00
H+O2<=>O+OH	2.650E+16	-.6707	17041.00
2H+M<=>H2+M	1.000E+18	-1.000	.00
H2/ .00/ H2O/ .00/ CH4/2.00/ CO2/ .00/ C2H6/3.00/ AR/ .63/			
2H+H2<=>2H2	9.000E+16	-.600	.00
2H+H2O<=>H2+H2O	6.000E+19	-1.250	.00
2H+CO2<=>H2+CO2	5.500E+20	-2.000	.00
H+OH+M<=>H2O+M	2.200E+22	-2.000	.00
H2/ .73/ H2O/3.65/ CH4/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .38/			
H+HO2<=>O+H2O	3.970E+12	.000	671.00
H+HO2<=>O2+H2	4.480E+13	.000	1068.00
H+HO2<=>2OH	0.840E+14	.000	635.00
H+H2O2<=>HO2+H2	1.210E+07	2.000	5200.00
H+H2O2<=>OH+H2O	1.000E+13	.000	3600.00
H+CH<=>C+H2	1.650E+14	.000	.00
H+CH2(+M)<=>CH3(+M)	6.000E+14	.000	.00
LOW / 1.040E+26 -2.760 1600.00/			
TROE/ .5620 91.00 5836.00 8552.00/			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
H+CH2(S)<=>CH+H2	3.000E+13	.000	.00
H+CH3(+M)<=>CH4(+M)	13.90E+15	-.534	536.00
LOW / 2.620E+33 -4.760 2440.00/			
TROE/ .7830 74.00 2941.00 6964.00 /			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/3.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
H+CH4<=>CH3+H2	6.600E+08	1.620	10840.00
H+HCO(+M)<=>CH2O(+M)	1.090E+12	.480	-260.00
LOW / 2.470E+24 -2.570 425.00/			
TROE/ .7824 271.00 2755.00 6570.00 /			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
H+HCO<=>H2+CO	7.340E+13	.000	.00
H+CH2O(+M)<=>CH2OH(+M)	5.400E+11	.454	3600.00
LOW / 1.270E+32 -4.820 6530.00/			
TROE/ .7187 103.00 1291.00 4160.00 /			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/			
H+CH2O(+M)<=>CH3O(+M)	5.400E+11	.454	2600.00
LOW / 2.200E+30 -4.800 5560.00/			
TROE/ .7580 94.00 1555.00 4200.00 /			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/			
H+CH2O<=>HCO+H2	5.740E+07	1.900	2742.00
H+CH2OH(+M)<=>CH3OH(+M)	1.055E+12	.500	86.00
LOW / 4.360E+31 -4.650 5080.00/			

```

TROE/ .600 100.00 90000.0 10000.0 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/
H+CH2OH<=>H2+CH2O 2.000E+13 .000 .00
H+CH2OH<=>OH+CH3 1.650E+11 .650 -284.00
H+CH2OH<=>CH2(S)+H2O 3.280E+13 -.090 610.00
H+CH3O(+M)<=>CH3OH(+M) 2.430E+12 .515 50.00
LOW / 4.660E+41 -7.440 14080.0/
TROE/ .700 100.00 90000.0 10000.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/
H+CH3O<=>H+CH2OH 4.150E+07 1.630 1924.00
H+CH3O<=>H2+CH2O 2.000E+13 .000 .00
H+CH3O<=>OH+CH3 1.500E+12 .500 -110.00
H+CH3O<=>CH2(S)+H2O 2.620E+14 -.230 1070.00
H+CH3OH<=>CH2OH+H2 1.700E+07 2.100 4870.00
H+CH3OH<=>CH3O+H2 4.200E+06 2.100 4870.00
H+C2H(+M)<=>C2H2(+M) 1.000E+17 -1.000 .00
LOW / 3.750E+33 -4.800 1900.00/
TROE/ .6464 132.00 1315.00 5566.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/
H+C2H2(+M)<=>C2H3(+M) 5.600E+12 .000 2400.00
LOW / 3.800E+40 -7.270 7220.00/
TROE/ .7507 98.50 1302.00 4167.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/
H+C2H3(+M)<=>C2H4(+M) 6.080E+12 .270 280.00
LOW / 1.400E+30 -3.860 3320.00/
TROE/ .7820 207.50 2663.00 6095.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/
H+C2H3<=>H2+C2H2 3.000E+13 .000 .00
H+C2H4(+M)<=>C2H5(+M) 0.540E+12 .454 1820.00
LOW / 0.600E+42 -7.620 6970.00/
TROE/ .9753 210.00 984.00 4374.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/
H+C2H4<=>C2H3+H2 1.325E+06 2.530 12240.00
H+C2H5(+M)<=>C2H6(+M) 5.210E+17 -.990 1580.00
LOW / 1.990E+41 -7.080 6685.00/
TROE/ .8422 125.00 2219.00 6882.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/
H+C2H5<=>H2+C2H4 2.000E+12 .000 .00
H+C2H6<=>C2H5+H2 1.150E+08 1.900 7530.00
H+HCCO<=>CH2(S)+CO 1.000E+14 .000 .00
H+CH2CO<=>HCCO+H2 5.000E+13 .000 8000.00
H+CH2CO<=>CH3+CO 1.130E+13 .000 3428.00
H+HCCOH<=>H+CH2CO 1.000E+13 .000 .00
H2+CO(+M)<=>CH2O(+M) 4.300E+07 1.500 79600.00
LOW / 5.070E+27 -3.420 84350.00/
TROE/ .9320 197.00 1540.00 10300.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/
OH+H2<=>H+H2O 2.160E+08 1.510 3430.00
2OH(+M)<=>H2O2(+M) 7.400E+13 -.370 .00
LOW / 2.300E+18 -.900 -1700.00/
TROE/ .7346 94.00 1756.00 5182.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/
2OH<=>O+H2O 3.570E+0 2.400 -2110.00
OH+HO2<=>O2+H2O 1.450E+13 .000 -500.00
DUPLICATE

```

OH+H2O2<=>HO2+H2O	2.000E+12	.000	427.00
DUPLICATE			
OH+H2O2<=>HO2+H2O	1.700E+18	.000	29410.00
DUPLICATE			
OH+C<=>H+CO	5.000E+13	.000	.00
OH+CH<=>H+HCO	3.000E+13	.000	.00
OH+CH2<=>H+CH2O	2.000E+13	.000	.00
OH+CH2<=>CH+H2O	1.130E+07	2.000	3000.00
OH+CH2(S)<=>H+CH2O	3.000E+13	.000	.00
OH+CH3(+M)<=>CH3OH(+M)	2.790E+18	-1.430	1330.00
LOW /	4.000E+36	-5.920	3140.00/
TROE/	.4120	195.0	5900.00 6394.00/
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/			
OH+CH3<=>CH2+H2O	5.600E+07	1.600	5420.00
OH+CH3<=>CH2(S)+H2O	6.440E+17	-1.340	1417.00
OH+CH4<=>CH3+H2O	1.000E+08	1.600	3120.00
OH+CO<=>H+CO2	4.760E+07	1.228	70.00
OH+HCO<=>H2O+CO	5.000E+13	.000	.00
OH+CH2O<=>HCO+H2O	3.430E+09	1.180	-447.00
OH+CH2OH<=>H2O+CH2O	5.000E+12	.000	.00
OH+CH3O<=>H2O+CH2O	5.000E+12	.000	.00
OH+CH3OH<=>CH2OH+H2O	1.440E+06	2.000	-840.00
OH+CH3OH<=>CH3O+H2O	6.300E+06	2.000	1500.00
OH+C2H<=>H+HCCO	2.000E+13	.000	.00
OH+C2H2<=>H+CH2CO	2.180E-04	4.500	-1000.00
OH+C2H2<=>H+HCCOH	5.040E+05	2.300	13500.00
OH+C2H2<=>C2H+H2O	3.370E+07	2.000	14000.00
OH+C2H2<=>CH3+CO	4.830E-04	4.000	-2000.00
OH+C2H3<=>H2O+C2H2	5.000E+12	.000	.00
OH+C2H4<=>C2H3+H2O	3.600E+06	2.000	2500.00
OH+C2H6<=>C2H5+H2O	3.540E+06	2.120	870.00
OH+CH2CO<=>HCCO+H2O	7.500E+12	.000	2000.00
2HO2<=>O2+H2O2	1.300E+11	.000	-1630.00
DUPLICATE			
2HO2<=>O2+H2O2	4.200E+14	.000	12000.00
DUPLICATE			
HO2+CH2<=>OH+CH2O	2.000E+13	.000	.00
HO2+CH3<=>O2+CH4	1.000E+12	.000	.00
HO2+CH3<=>OH+CH3O	3.780E+13	.000	.00
HO2+CO<=>OH+CO2	1.500E+14	.000	23600.00
HO2+CH2O<=>HCO+H2O2	5.600E+06	2.000	12000.00
C+O2<=>O+CO	5.800E+13	.000	576.00
C+CH2<=>H+C2H	5.000E+13	.000	.00
C+CH3<=>H+C2H2	5.000E+13	.000	.00
CH+O2<=>O+HCO	6.710E+13	.000	.00
CH+H2<=>H+CH2	1.080E+14	.000	3110.00
CH+H2O<=>H+CH2O	5.710E+12	.000	-755.00
CH+CH2<=>H+C2H2	4.000E+13	.000	.00
CH+CH3<=>H+C2H3	3.000E+13	.000	.00
CH+CH4<=>H+C2H4	6.000E+13	.000	.00
CH+CO(+M)<=>HCCO(+M)	5.000E+13	.000	.00
LOW /	2.690E+28	-3.740	1936.00/
TROE/	.5757	237.00	1652.00 5069.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
CH+CO2<=>HCO+CO	1.900E+14	.000	15792.00

CH+CH2O<=>H+CH2CO	9.460E+13	.000	-515.00
CH+HCCO<=>CO+C2H2	5.000E+13	.000	.00
CH2+O2=>OH+H+CO	5.000E+12	.000	1500.00
CH2+H2<=>H+CH3	5.000E+05	2.000	7230.00
2CH2<=>H2+C2H2	1.600E+15	.000	11944.00
CH2+CH3<=>H+C2H4	4.000E+13	.000	.00
CH2+CH4<=>2CH3	2.460E+06	2.000	8270.00
CH2+CO(+M)<=>CH2CO(+M)	8.100E+11	.500	4510.00
LOW /	2.690E+33	-5.110	7095.00/
TROE/	.5907	275.00	1226.00 5185.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
CH2+HCCO<=>C2H3+CO	3.000E+13	.000	.00
CH2(S)+N2<=>CH2+N2	1.500E+13	.000	600.00
CH2(S)+AR<=>CH2+AR	9.000E+12	.000	600.00
CH2(S)+O2<=>H+OH+CO	2.800E+13	.000	.00
CH2(S)+O2<=>CO+H2O	1.200E+13	.000	.00
CH2(S)+H2<=>CH3+H	7.000E+13	.000	.00
CH2(S)+H2O(+M)<=>CH3OH(+M)	4.820E+17	-1.160	1145.00
LOW /	1.880E+38	-6.360	5040.00/
TROE/	.6027	208.00	3922.00 10180.0 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/			
CH2(S)+H2O<=>CH2+H2O	3.000E+13	.000	.00
CH2(S)+CH3<=>H+C2H4	1.200E+13	.000	-570.00
CH2(S)+CH4<=>2CH3	1.600E+13	.000	-570.00
CH2(S)+CO<=>CH2+CO	9.000E+12	.000	.00
CH2(S)+CO2<=>CH2+CO2	7.000E+12	.000	.00
CH2(S)+CO2<=>CO+CH2O	1.400E+13	.000	.00
CH2(S)+C2H6<=>CH3+C2H5	4.000E+13	.000	-550.00
CH3+O2<=>O+CH3O	3.560E+13	.000	30480.00
CH3+O2<=>OH+CH2O	2.310E+12	.000	20315.00
CH3+H2O2<=>HO2+CH4	2.450E+04	2.470	5180.00
2CH3(+M)<=>C2H6(+M)	6.770E+16	-1.180	654.00
LOW /	3.400E+41	-7.030	2762.00/
TROE/	.6190	73.20	1180.00 9999.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
2CH3<=>H+C2H5	6.840E+12	.100	10600.00
CH3+HCO<=>CH4+CO	2.648E+13	.000	.00
CH3+CH2O<=>HCO+CH4	3.320E+03	2.810	5860.00
CH3+CH3OH<=>CH2OH+CH4	3.000E+07	1.500	9940.00
CH3+CH3OH<=>CH3O+CH4	1.000E+07	1.500	9940.00
CH3+C2H4<=>C2H3+CH4	2.270E+05	2.000	9200.00
CH3+C2H6<=>C2H5+CH4	6.140E+06	1.740	10450.00
HCO+H2O<=>H+CO+H2O	1.500E+18	-1.000	17000.00
HCO+M<=>H+CO+M	1.870E+17	-1.000	17000.00
H2/2.00/ H2O/ .00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/			
HCO+O2<=>HO2+CO	13.45E+12	.000	400.00
CH2OH+O2<=>HO2+CH2O	1.800E+13	.000	900.00
CH3O+O2<=>HO2+CH2O	4.280E-13	7.600	-3530.00
C2H+O2<=>HCO+CO	1.000E+13	.000	-755.00
C2H+H2<=>H+C2H2	5.680E+10	0.900	1993.00
C2H3+O2<=>HCO+CH2O	4.580E+16	-1.390	1015.00
C2H4(+M)<=>H2+C2H2(+M)	8.000E+12	.440	86770.00
LOW /	1.580E+51	-9.300	97800.00/
TROE/	.7345	180.00	1035.00 5417.00 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			

C2H5+O2<=>HO2+C2H4	8.400E+11	.000	3875.00
HCCO+O2<=>OH+2CO	3.200E+12	.000	854.00
2HCCO<=>2CO+C2H2	1.000E+13	.000	.00
N+NO<=>N2+O	2.700E+13	.000	355.00
N+O2<=>NO+O	9.000E+09	1.000	6500.00
N+OH<=>NO+H	3.360E+13	.000	385.00
N2O+O<=>N2+O2	1.400E+12	.000	10810.00
N2O+O<=>2NO	2.900E+13	.000	23150.00
N2O+H<=>N2+OH	3.870E+14	.000	18880.00
N2O+OH<=>N2+HO2	2.000E+12	.000	21060.00
N2O(+M)<=>N2+O(+M)	7.910E+10	.000	56020.00
LOW / 6.370E+14	.000	56640.00/	
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/			
.625/			
HO2+NO<=>NO2+OH	2.110E+12	.000	-480.00
NO+O+M<=>NO2+M	1.060E+20	-1.410	.00
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/			.70/
NO2+O<=>NO+O2	3.900E+12	.000	-240.00
NO2+H<=>NO+OH	1.320E+14	.000	360.00
NH+O<=>NO+H	4.000E+13	.000	.00
NH+H<=>N+H2	3.200E+13	.000	330.00
NH+OH<=>HNO+H	2.000E+13	.000	.00
NH+OH<=>N+H2O	2.000E+09	1.200	.00
NH+O2<=>HNO+O	4.610E+05	2.000	6500.00
NH+O2<=>NO+OH	1.280E+06	1.500	100.00
NH+N<=>N2+H	1.500E+13	.000	.00
NH+H2O<=>HNO+H2	2.000E+13	.000	13850.00
NH+NO<=>N2+OH	2.160E+13	-.230	.00
NH+NO<=>N2O+H	3.650E+14	-.450	.00
NH2+O<=>OH+NH	3.000E+12	.000	.00
NH2+O<=>H+HNO	3.900E+13	.000	.00
NH2+H<=>NH+H2	4.000E+13	.000	3650.00
NH2+OH<=>NH+H2O	9.000E+07	1.500	-460.00
NNH<=>N2+H	3.300E+08	.000	.00
NNH+M<=>N2+H+M	1.300E+14	-.110	4980.00
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/			.70/
NNH+O2<=>HO2+N2	5.000E+12	.000	.00
NNH+O<=>OH+N2	2.500E+13	.000	.00
NNH+O<=>NH+NO	7.000E+13	.000	.00
NNH+H<=>H2+N2	5.000E+13	.000	.00
NNH+OH<=>H2O+N2	2.000E+13	.000	.00
NNH+CH3<=>CH4+N2	2.500E+13	.000	.00
H+NO+M<=>HNO+M	4.480E+19	-1.320	740.00
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/			.70/
HNO+O<=>NO+OH	2.500E+13	.000	.00
HNO+H<=>H2+NO	9.000E+11	.720	660.00
HNO+OH<=>NO+H2O	1.300E+07	1.900	-950.00
HNO+O2<=>HO2+NO	1.000E+13	.000	13000.00
CN+O<=>CO+N	7.700E+13	.000	.00
CN+OH<=>NCO+H	4.000E+13	.000	.00
CN+H2O<=>HCN+OH	8.000E+12	.000	7460.00
CN+O2<=>NCO+O	6.140E+12	.000	-440.00
CN+H2<=>HCN+H	2.950E+05	2.450	2240.00
NCO+O<=>NO+CO	2.350E+13	.000	.00
NCO+H<=>NH+CO	5.400E+13	.000	.00

NCO+OH<=>NO+H+CO	0.250E+13	.000	.00
NCO+N<=>N2+CO	2.000E+13	.000	.00
NCO+O2<=>NO+CO2	2.000E+12	.000	20000.00
NCO+M<=>N+CO+M	3.100E+14	.000	54050.00
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
NCO+NO<=>N2O+CO	1.900E+17	-1.520	740.00
NCO+NO<=>N2+CO2	3.800E+18	-2.000	800.00
HCN+M<=>H+CN+M	1.040E+29	-3.300	126600.00
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
HCN+O<=>NCO+H	2.030E+04	2.640	4980.00
HCN+O<=>NH+CO	5.070E+03	2.640	4980.00
HCN+O<=>CN+OH	3.910E+09	1.580	26600.00
HCN+OH<=>HOCN+H	1.100E+06	2.030	13370.00
HCN+OH<=>HNCO+H	4.400E+03	2.260	6400.00
HCN+OH<=>NH2+CO	1.600E+02	2.560	9000.00
H+HCN(+M)<=>H2CN(+M)	3.300E+13	.000	.00
LOW / 1.400E+26 -3.400 1900.00/			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
H2CN+N<=>N2+CH2	6.000E+13	.000	400.00
C+N2<=>CN+N	6.300E+13	.000	46020.00
CH+N2<=>HCN+N	3.120E+09	0.880	20130.00
CH+N2(+M)<=>HCNN(+M)	3.100E+12	.150	.00
LOW / 1.300E+25 -3.160 740.00/			
TROE/ .6670 235.00 2117.00 4536.00 /			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ 1.0/			
CH2+N2<=>HCN+NH	1.000E+13	.000	74000.00
CH2(S)+N2<=>NH+HCN	1.000E+11	.000	65000.00
C+NO<=>CN+O	1.900E+13	.000	.00
C+NO<=>CO+N	2.900E+13	.000	.00
CH+NO<=>HCN+O	4.100E+13	.000	.00
CH+NO<=>H+NCO	1.620E+13	.000	.00
CH+NO<=>N+HCO	2.460E+13	.000	.00
CH2+NO<=>H+HNCO	3.100E+17	-1.380	1270.00
CH2+NO<=>OH+HCN	2.900E+14	-.690	760.00
CH2+NO<=>H+HCNO	3.800E+13	-.360	580.00
CH2(S)+NO<=>H+HNCO	3.100E+17	-1.380	1270.00
CH2(S)+NO<=>OH+HCN	2.900E+14	-.690	760.00
CH2(S)+NO<=>H+HCNO	3.800E+13	-.360	580.00
CH3+NO<=>HCN+H2O	9.600E+13	.000	28800.00
CH3+NO<=>H2CN+OH	1.000E+12	.000	21750.00
HCNN+O<=>CO+H+N2	2.200E+13	.000	.00
HCNN+O<=>HCN+NO	2.000E+12	.000	.00
HCNN+O2<=>O+HCO+N2	1.200E+13	.000	.00
HCNN+OH<=>H+HCO+N2	1.200E+13	.000	.00
HCNN+H<=>CH2+N2	1.000E+14	.000	.00
HNCO+O<=>NH+CO2	9.800E+07	1.410	8500.00
HNCO+O<=>HNO+CO	1.500E+08	1.570	44000.00
HNCO+O<=>NCO+OH	2.200E+06	2.110	11400.00
HNCO+H<=>NH2+CO	2.250E+07	1.700	3800.00
HNCO+H<=>H2+NCO	1.050E+05	2.500	13300.00
HNCO+OH<=>NCO+H2O	3.300E+07	1.500	3600.00
HNCO+OH<=>NH2+CO2	3.300E+06	1.500	3600.00
HNCO+M<=>NH+CO+M	1.180E+16	.000	84720.00
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
HCNO+H<=>H+HNCO	2.100E+15	-.690	2850.00

HCNO+H<=>OH+HCN	2.700E+11	.180	2120.00
HCNO+H<=>NH2+CO	1.700E+14	-.750	2890.00
HOCN+H<=>H+HNCO	2.000E+07	2.000	2000.00
HCCO+NO<=>HCNO+CO	0.900E+13	.000	.00
CH3+N<=>H2CN+H	6.100E+14	-.310	290.00
CH3+N<=>HCN+H2	3.700E+12	.150	-90.00
NH3+H<=>NH2+H2	5.400E+05	2.400	9915.00
NH3+OH<=>NH2+H2O	5.000E+07	1.600	955.00
NH3+O<=>NH2+OH	9.400E+06	1.940	6460.00
NH+CO2<=>HNO+CO	1.000E+13	.000	14350.00
CN+NO2<=>NCO+NO	6.160E+15	-0.752	345.00
NCO+NO2<=>N2O+CO2	3.250E+12	.000	-705.00
N+CO2<=>NO+CO	3.000E+12	.000	11300.00
O+CH3=>H+H2+CO	3.370E+13	.000	.00
O+C2H4<=>H+CH2CHO	6.700E+06	1.830	220.00
O+C2H5<=>H+CH3CHO	1.096E+14	.000	.00
OH+HO2<=>O2+H2O	0.500E+16	.000	17330.00
DUPLICATE			
OH+CH3=>H2+CH2O	8.000E+09	.500	-1755.00
CH+H2(+M)<=>CH3(+M)	1.970E+12	.430	-370.00
LOW/ 4.820E+25 -2.80 590.0 /			
TROE/ .578 122.0 2535.0 9365.0 /			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
CH2+O2=>2H+CO2	5.800E+12	.000	1500.00
CH2+O2<=>O+CH2O	2.400E+12	.000	1500.00
CH2+CH2=>2H+C2H2	2.000E+14	.000	10989.00
CH2(S)+H2O=>H2+CH2O	6.820E+10	.250	-935.00
C2H3+O2<=>O+CH2CHO	3.030E+11	.290	11.00
C2H3+O2<=>HO2+C2H2	1.337E+06	1.610	-384.00
O+CH3CHO<=>OH+CH2CHO	2.920E+12	.000	1808.00
O+CH3CHO=>OH+CH3+CO	2.920E+12	.000	1808.00
O2+CH3CHO=>HO2+CH3+CO	3.010E+13	.000	39150.00
H+CH3CHO<=>CH2CHO+H2	2.050E+09	1.160	2405.00
H+CH3CHO=>CH3+H2+CO	2.050E+09	1.160	2405.00
OH+CH3CHO=>CH3+H2O+CO	2.343E+10	0.730	-1113.00
HO2+CH3CHO=>CH3+H2O2+CO	3.010E+12	.000	11923.00
CH3+CH3CHO=>CH3+CH4+CO	2.720E+06	1.770	5920.00
H+CH2CO(+M)<=>CH2CHO(+M)	4.865E+11	0.422	-1755.00
LOW/ 1.012E+42 -7.63 3854.0 /			
TROE/ 0.465 201.0 1773.0 5333.0 /			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
O+CH2CHO=>H+CH2+CO2	1.500E+14	.000	.00
O2+CH2CHO=>OH+CO+CH2O	1.810E+10	.000	.00
O2+CH2CHO=>OH+2HCO	2.350E+10	.000	.00
H+CH2CHO<=>CH3+HCO	2.200E+13	.000	.00
H+CH2CHO<=>CH2CO+H2	1.100E+13	.000	.00
OH+CH2CHO<=>H2O+CH2CO	1.200E+13	.000	.00
OH+CH2CHO<=>HCO+CH2OH	3.010E+13	.000	.00
CH3+C2H5(+M)<=>C3H8(+M)	.9430E+13	.000	.00
LOW/ 2.710E+74 -16.82 13065.0 /			
TROE/ .1527 291.0 2742.0 7748.0 /			
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
O+C3H8<=>OH+C3H7	1.930E+05	2.680	3716.00
H+C3H8<=>C3H7+H2	1.320E+06	2.540	
6756.00			

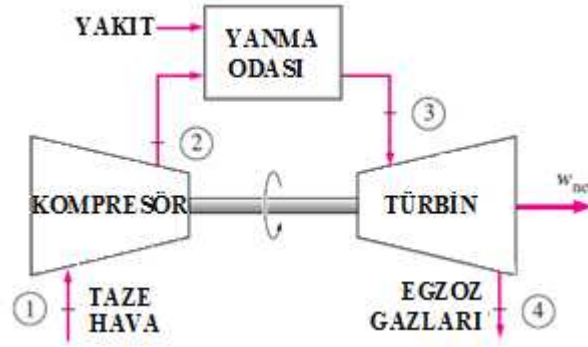
OH+C3H8<=>C3H7+H2O	3.160E+07	1.800	934.00
C3H7+H2O2<=>HO2+C3H8	3.780E+02	2.720	1500.00
CH3+C3H8<=>C3H7+CH4	0.903E+00	3.650	7154.00
CH3+C2H4(+M)<=>C3H7(+M)	2.550E+06	1.600	5700.00
LOW/	3.00E+63	-14.6	18170./
TROE/	.1894	277.0	8748.0 7891.0 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
O+C3H7<=>C2H5+CH2O	9.640E+13	.000	.00
H+C3H7(+M)<=>C3H8(+M)	3.613E+13	.000	.00
LOW/	4.420E+61	-13.545	11357.0/
TROE/	.315	369.0	3285.0 6667.0 /
H2/2.00/ H2O/6.00/ CH4/2.00/ CO/1.50/ CO2/2.00/ C2H6/3.00/ AR/ .70/			
H+C3H7<=>CH3+C2H5	4.060E+06	2.190	890.00
OH+C3H7<=>C2H5+CH2OH	2.410E+13	.000	.00
HO2+C3H7<=>O2+C3H8	2.550E+10	0.255	-943.00
HO2+C3H7=>OH+C2H5+CH2O	2.410E+13	.000	.00
CH3+C3H7<=>2C2H5	1.927E+13	-0.320	.00
END			

EK B

BRAYTON ÇEVİRİMİ

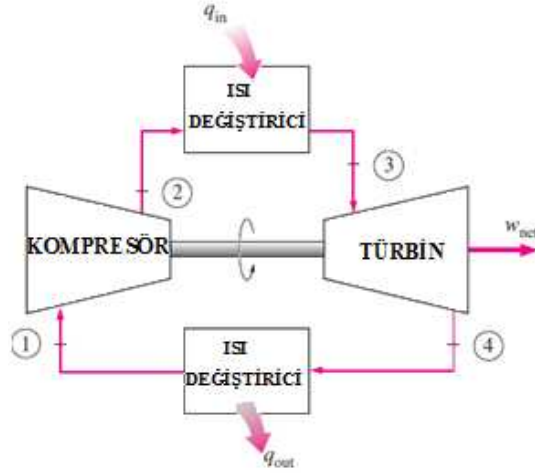
B.1. İdeal Brayton Çevrimi

Brayton çevrimi George Brayton tarafından 1870'li yıllarda bulunmuştur. Bu çevrimin kullanımı, sıkıştırma ve genişlemenin aksel kompresörler ve türbinlerde olduğu gaz türbinleriyle sınırlıdır. Gaz türbinleri genelde Şekil B.1'de gösterildiği gibi açık çevrimde çalışır.



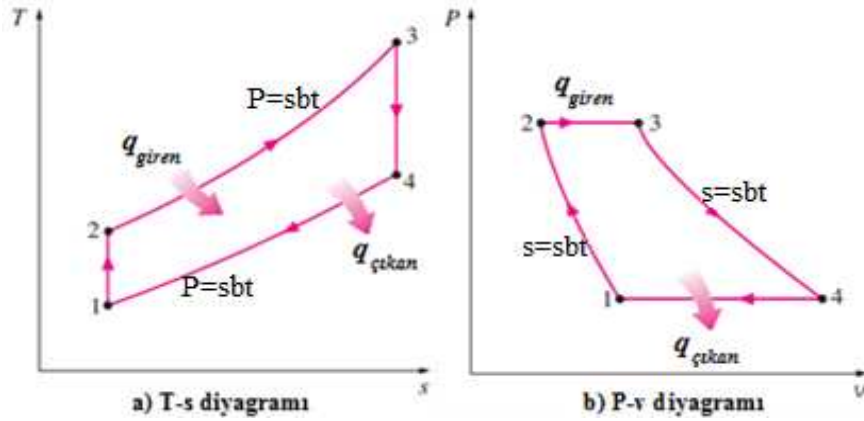
Şekil B.1. Açık çevrime göre çalışan bir gaz türbini (Çengel Y.A ve Boles M.A.)

Çevre koşullarındaki hava, kompresör tarafından emilerek sıkıştırılır, basıncı ve sıcaklığı artar. Yüksek basınçlı hava daha sonra, yakıtın sabit basınçta yakıldığı yanma odasına girer. Yanma odasında oluşan yüksek sıcaklıktaki gazlar türbinde çevre basıncına genişlerken iş yapar. Türbinden çıkan egzoz gazları atmosfere atılır. Bu anlatılan çevrim Şekil B.2'de gösterildiği gibi kapalı bir çevrim olarak da uygulanabilir. Bu çevrimde sıkıştırma ve genişleme işlemleri değişmemektedir, yanma işleminin yerine çevrime sabit basınçta ısı geçişi, egzoz işleminin yerini ise çevreye sabit basınçta ısı verilmesi almaktadır.



Şekil B.2. Kapalı çevrime göre çalışan bir gaz türbini (Çengel Y.A ve Boles M.A.)

İdeal Brayton çevriminin T-s ve P-v diyagramları Şekil B.3'de gösterilmektedir. Aşağıda belirtilen dört tersinir hal değişiminden oluşur.



Şekil B.3. İdeal Brayton çevriminin T-s ve P-v diyagramları (Çengel Y.A ve Boles M.A.)

- 1-2 Kompresörde izantropik sıkıştırma
- 2-3 Sisteme sabit basınçta ısı geçişi
- 3-4 Türbinde izantropik genişleme
- 4-1 Çevreye sabit basınçta ısı geçişi

Brayton çevriminin verim ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$\eta_{th,Brayton} = \frac{W_{net}}{q_g} = 1 - \frac{q_c}{q_g} = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (B.1)$$

1-2 ve 3-4 hal değişimlerinin izentropik ve $P_2 = P_3$, $P_4 = P_1$ olduğu not edilirse;

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{(k-1)}{k}} = \frac{T_3}{T_4} \quad (B.2)$$

Bu bağlantılar, ısıl verim için yazılan denklemde yerine konur ve sadeleştirme yapılırsa,

$$\eta_{th,Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{\frac{k-1}{k}}} \quad (B.3)$$

Burada r_p basınç oranı olup, denklem (B.4)' de tanımlanmıştır.

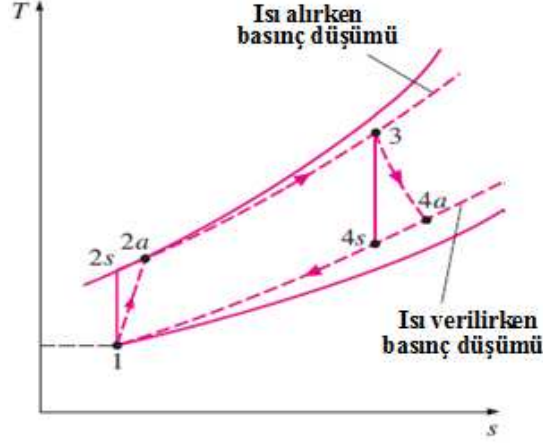
$$r_p = \frac{P_2}{P_1} \quad (B.4)$$

B.2. Gerçek Gaz Türbini Çevriminin İdeal Çevrimden Farklılığı

Gerçek gaz türbini çevrimi ideal çevrimden bazı bakımlardan ayrılır. Öncelikle, ısıl geçişi sırasında az da olsa basınç kaybı vardır. İkinci olarak, sürtünme ve sanki-dengeli-olmayan hal değişimlerinden kaynaklanan tersinmezliklerden dolayı kompresörün işi daha çok, türbin işi daha az olur. Gerçek türbinin ve kompresörün çalışmasıyla izentropik genişleme ve sıkıştırma arasında bir ilişki, türbin ve kompresör için adyabatik verim tanımlarından yararlanarak kurulabilir:

$$\eta_K = \frac{w_s}{w_a} \cong \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} \quad (B.5)$$

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} \cong \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (B.6)$$



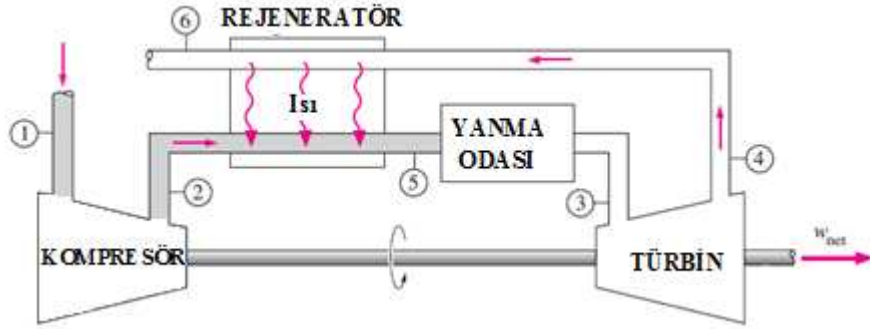
Şekil B.4. Gerçek gaz türbini çevriminin tersinmezlik nedeniyle ideal Brayton çevriminden sapması (Çengel Y.A ve Boles M.A.)

Burada 2a ve 4a, Şekil (B.4)'de gösterildiği gibi, sırasıyla kompresör ve türbindeki gerçek çıkış halleri, 2s ve 4s ise izentropik sıkıştırma ve genişleme sonrasındaki halleri simgelemektedir.

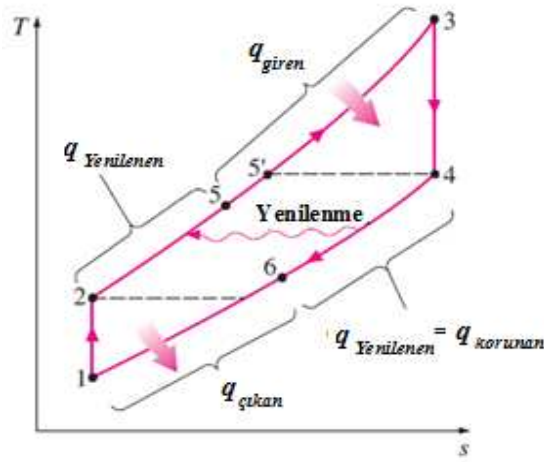
B.3. Jeneratörlü Brayton Çevrimi

Gaz türbinlerinde türbinden çıkan yanma sonu gazların sıcaklığı, genellikle kompresörden çıkan havanın sıcaklığından çok daha yüksektir. Bu nedenle, kompresörden çıkan yüksek basınçlı hava, rejeneratör veya rekuperatör adı verilen ters akışlı bir ısıl değiştiricisinde türbinden çıkan sıcak yanma sonu gazlarıyla ısıtılabilir. Rejeneratörlü bir gaz türbininin genel çizimi ve buna bağlı çevrimin T-s diyagramı Şekil (B.5)'de gösterilmiştir.

Brayton çevrim ısıl verimi rejeneratör kullanımı ile artar çünkü basit çevrimde yanma sonu gazlarıyla çevreye verilen ısının bir bölümü yanma odasına giren havayı ısıtmak için kullanılır. Bu nedenle aynı net iş için, yanma odasında çevrime verilen ısı (yakıt girdisi) azalır. Rejeneratör ancak türbin çıkış sıcaklığı kompresör çıkış sıcaklığından büyük olduğu zaman yarar sağlayacaktır.



Şekil B.5. Rejeneratörlü bir gaz çevrimi (Çengel Y.A ve Boles M.A.)



Şekil B.6. Rejeneratörlü bir Brayton çevriminin T-s diyagramı (Çengel Y.A ve Boles M.A.)

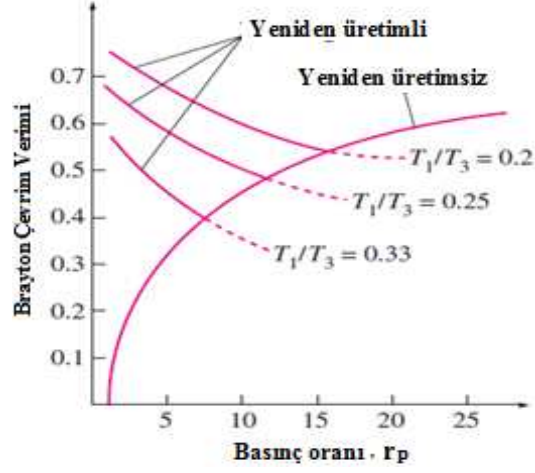
Rejeneratör etkinliği şu şekilde ifade edilebilir;

$$\varepsilon = \frac{q_{rej,gerçek}}{w_{rej,maks}} = \frac{h_5 - h_2}{h_4 - h_2} \quad (B.5)$$

Soğuk hava standardı kabulleri altında, rejeneratörlü ideal Brayton çevriminin ısı verimi aşağıda verilmiştir:

$$\eta_{th,rej} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (B.6)$$

Denklem (B.6), rejeneratörlü ideal Brayton çevriminin ısı verimi, çevrimin en düşük sıcaklığının en yüksek sıcaklığına oranıyla çevrimin basınç oranına eşit olduğunu ifade etmektedir. Şekil (B.7)'de görülebildiği gibi rejenerasyon düşük basınç oranları ve düşük (T_1/T_3) oranlarında etkili olmaktadır.



Şekil B.7. Rejenerasyonlu ve rejenerasyonuz ideal Brayton çevriminin ısı verimi (Çengel Y.A ve Boles M.A.)

EK C



Model TA 80R 80 kW Turbo Alternator™

Elliott Energy Systems, Inc. has been designing and developing Microturbines since 1993. Our experience has made us a leader in microturbine technology. We have developed an 80 kW Microturbine Genset. It can produce 80kW of Electrical Power and significant thermal energy that can be used for Co-generation; hot water, low pressure steam, absorption chillers and drying systems. Your overall energy efficiency using co-generation could be as high as 70 - 80%.

Elliott Energy Systems Inc. is a fully owned subsidiary company of Ebara Corporation of Tokyo, Japan.

Electrical Output

80 kWe @ ISO Conditions

Voltage:	480 VAC
Amperage:	120
Three Phase (Wye)	60/ 50 Hz

Standard Equipment:

- Emergency stop
- 80 kW Gas Turbine
- 4 Pole Permanent Magnet Generator
- 80 kW Synchronous Output Inverter
- Manual Output Contactor
- Push Button Start/ Stop
- Automatic Voltage Regulation
- 24 VDC Stand Alone Start System
- 24 VDC Electrical System
- Battery Charger
- Single Stage Dry Type Air Filter
- Corrosion Resistant Hardware
- Digital LCD Display
- IEEE 519 Compliant

Turbine and Compressor:

The Turbine, Compressor and Main Shaft are inertia welded into a single piece. Compressor and Main Shaft are formed from Stainless Steel, the Turbine is made of a High Temperature Creep resistant alloy.

Main Stator:

The Stator is a conventional copper wound design which is oil cooled and mounted into a common casing with the turbine and compressor assembly.

Main Rotor:

The Alternator Rotor is a permanent magnet four pole design which is pressed onto the rotor assembly. A carbon fiber sleeve is used to retain the rotor magnets.

Communications:

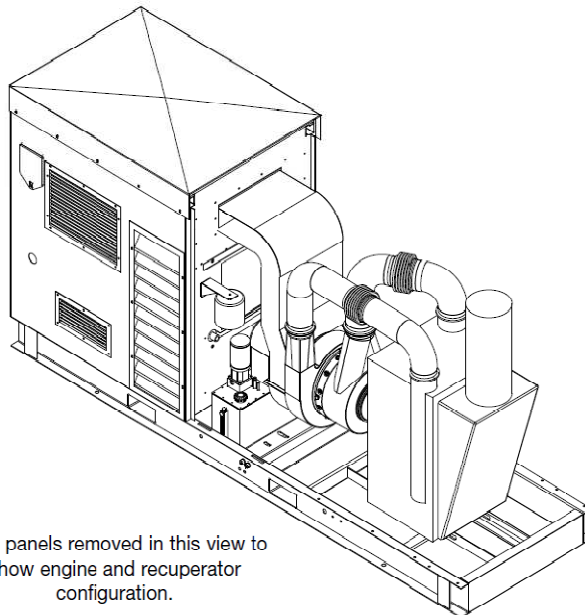
Modbus Protocol RS232

Inverter:

The Inverter rectifies the 2267 Hz AC voltage produced by the alternator into ~550 - 650 VDC unregulated. It then converts the DC voltage into 50Hz or 60 Hz 480 VAC

Bearings:

The Micro Turbine Utilizes Two Primary Bearings. The inboard bearing is a conventional hydrodynamic design and the outer-bearing is a rolling element bearing utilizing ceramic balls. Both bearings are lubricated and cooled by synthetic oil.



Side panels removed in this view to show engine and recuperator configuration.

Turbo Alternator™ Specifications

Engine Specifications

Manufacturer- Elliott Energy Systems
 Model - TA-80
 Type - Recuperated Gas Turbine
 Compressor Pressure Ratio - 4 to 1

Cooling System

Engine Oil Cooled
 Alternator Oil Cooled
 Capacity 5 gal.
 Coolant Flow 5 gal. per min.
 Inverter Air Cooled

Enclosure Cooling Flow

Engine Compartment 750 CFM
 Electronics Compartment 300 CFM

Exhaust System

Outlet Size 10"
 Rated Back Pressure 5 In wc

Fuel System

Regulated Fuel Supply
 Gaseous 78 PSIG 5.38 Bar(G)

Fuel Consumption (ISO Rated Power)

CNG Recuperated: 17.3 SCFM
 (@ 940 Btu/SCFM)

Heat Rate

Full Load 12,200 BTU/ kWhr

Lubrication System

Oil Type Mil-L-23699 Equivalent
 Mobil SHC 824 Preferred

Oil Capacity with Filters

5 US gal. (19 L)
 Oil Filter Spin On Type, 5 Micron

Exhaust Emissions, Natural Gas

CO: < 30 PPM
 NOx: < 25 PPM

Exhaust Gas

Temperature 450° F
 Flow 1.7 lbs. / sec.

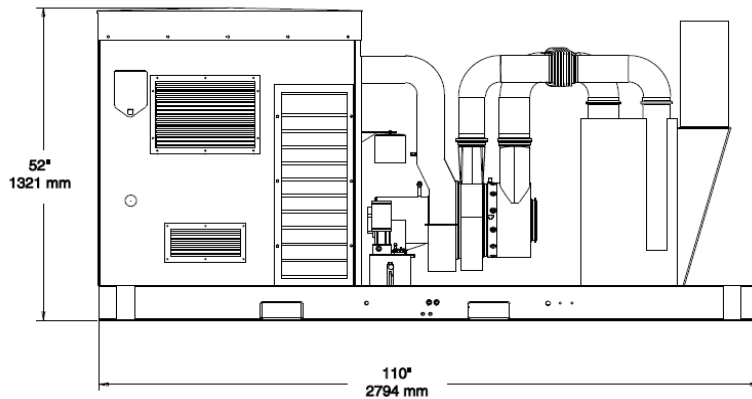
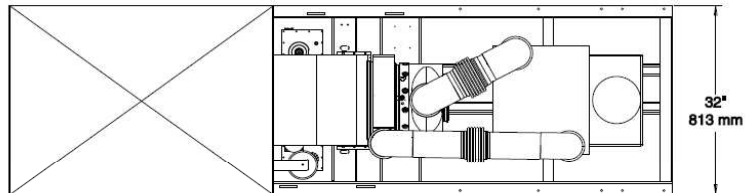
Exhaust Energy:

595,000 BTU/hr

Total Weight with Enclosure:

Recuperated 1890 Lbs./ 857 kg.

Batteries (qty. 2) 12V min. 850 (CCA)



2901 SE Monroe St.
 Stuart, FL 34997

For more information please contact:

Sale & Marketing
 Tel:772-219-9449
 Fax:772-219-9448

The specifications in this catalogue are subject to change without prior notice.

©2002 by Elliott Energy Systems, Inc. All Rights Reserved

EESI6 TA-80R Revision 2