

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAKICIDA HAVA YAKIT KARIŞIMININ  
PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**MUSTAFA ÖNAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISI PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. ÖZDEN AĞRA**

**İSTANBUL, 2017**



**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAKICIDA HAVA YAKIT KARIŞIMININ**  
**PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Mustafa ÖNAL tarafından hazırlanan tez çalışması 01.06.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Özden AĞRA

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Özden AĞRA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA

Trakya Üniversitesi

---

---

---

## ÖNSÖZ

---

Hem lisans hem de yüksek lisans hayatım boyunca yardımlarını hiç esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle daima destek olduğu gibi kariyer anlamında seçimlerimde de yol gösterici olan, hayattaki duruşuyla daima örnek alınacak değerli hocam Sayın Doç. Dr. Özden AĞRA'ya yüksek lisans tez çalışmamda yaptığı katkılardan dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca gerekli laboratuvar altyapısını ve her türlü olanaklarını sunarak destek olan Arçelik A.Ş. Ar-Ge Direktörümüz Sayın Cem KURAL'a, Mekanik Teknolojiler Yöneticimiz Sayın Emre OĞUZ'a, Isıl Teknolojiler Yöneticimiz Sayın Levent AKDAĞ'a ve Akışkanlar Dinamiği Teknolojileri Aile Liderimiz Sayın Haluk KARATAŞ'a teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisansım boyunca her konuda bana destek veren, tezimi en iyi şekilde yapmam için her türlü bilgi birikimi ve imkanları sağlayıp tezimin her aşamasında yanımda olan Sayın Beria Işık CANTÜRK'e tüm içtenliğimle minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Lisans bitirme tezimden itibaren bilgi ve tecrübesiyle bana daima destek verip her türlü imkanı sunan Sayın Yusuf KOÇ'a her şey için tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansa başladığımdan bu yana her konuda desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesine oldukça güvendiğim Sayın Murat KANTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneysel bölümünde yardımcı olan, bilgi ve tecrübeleriyle daima yol gösteren Sayın Sedat TOKGÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans dönemimde, proje mühendisi olarak başladığım günden bu yana değerli desteklerini esirgemeyen Sayın Vasi Kadir ERTİŞ, Sayın Burak ÇOBAN, Sayın Mehmet MARAŞLI ve Sayın Nihat KARGI başta olmak üzere ARÇELİK A.Ş. Ar-Ge Akışkanlar Dinamiği Ailesindeki tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatta her anımda desteklerini hiç esirgemeyerek sürekli yanımda duran, beni her şeyi yapabileceğime inandıran, varlıklarıyla güç kazandıran yerleri hiçbir şekilde doldurulamayacak olan aileme tüm içtenliğimle minnet ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Mayıs, 2017

Mustafa ÖNAL

## İÇİNDEKİLER

---

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xiv
ÖZET .....	xv
ABSTRACT.....	xvii
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Tezin Amacı .....	2
1.3 Hipotez.....	2
<b>BÖLÜM 2</b>	
YANMANIN TEMELLERİ .....	4
2.1 Yanmanın Temelleri .....	4
2.1.1 Hava-Yakıt Karışımı .....	5
2.1.1.1 Teorik (Stokiyometrik) Yanma .....	5
2.1.1.2 Tam Yanma.....	6
2.1.1.3 Eksik Yanma.....	7
2.1.1.4 Kısmi Eksik Yanma .....	7
2.1.2 Tutuşma Sıcaklığı .....	7
2.1.3 Zaman .....	7
2.2 Yanma Özellikleri .....	8
2.2.1 Yanabilirlik Sınırı .....	8
2.2.2 Yanma Hızı .....	9
2.2.3 Alev Kararlılığı .....	10
2.3 Yakıt Özellikleri.....	11

2.3.1	Metanın Yanması.....	11
2.3.2	Zararlı Yanma Sonu Ürünleri .....	12
2.3.3	Gaz Karışımlarının Özellikleri .....	13
2.4	Alev Yapıları .....	15
2.4.1	Ön Karışimsız Yanma .....	16
2.4.2	Ön Karışimli Yanma.....	17
<b>BÖLÜM 3</b>		
EV TİPİ YAKICILAR.....		19
3.1	Enjektörler .....	22
3.2	Birincil Hava Girişi .....	24
3.3	Dinamik Denge.....	30
3.3.1	Alev Kopması .....	31
3.3.2	Alevin Geri Tepmesi.....	32
3.3.3	Sarı Bölge Oluşumu.....	32
<b>BÖLÜM 4</b>		
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....		33
<b>BÖLÜM 5</b>		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....		52
5.1	Güç Deneyi .....	55
5.2	Verim Deneyi .....	56
5.3	Emisyon Deneyi.....	60
5.4	Hacimsel Debi Ölçümü.....	63
5.5	PIV Sistemiyle Akış Görselleme.....	67
<b>BÖLÜM 6</b>		
SAYISAL MODELLEME .....		73
6.1	Referans Yakıcı Modeli.....	74
6.1.1	Hacimsel Debi Doğrulama .....	74
6.1.2	PIV Sonucu Hız Dağılımı Doğrulama .....	76
6.1.3	Referans Yakıcı Soğuk Akış Analizi .....	79
6.2	Parametrik Analizler.....	81
6.2.1	Parametrelerin Tanımlanması .....	81
6.2.2	Analiz Planının Oluşturulması .....	84
6.2.3	Parametrik Analiz Sonuçları.....	86
6.3	Yanma Analizi.....	92
<b>BÖLÜM 7</b>		
SONUÇ VE ÖNERİLER .....		95
KAYNAKLAR .....		101

ÖZGEÇMİŞ.....	103
---------------	-----

## SİMGE LİSTESİ

---

A	Alan
C	Karbon
$C_d$	Boşaltım katsayısı
$C_L$	Sürtünme kayıp katsayısı
$C_p$	Isıl kapasite
CO	Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
$D_p$	Yakıcı port çapı
F	Kuvvet
f	Düzeltilme faktörü
g	Yerçekimi ivmesi
H <sub>2</sub>	Hidrojen
H <sub>2</sub> O	Su
$h_f$	Alev yüksekliği
O <sub>2</sub>	Oksijen
OH	Hidroksit
NO <sub>x</sub>	Azot oksitleri
$\dot{m}$	Kütlesel debi
$m_e$	Eşdeğer kütle
P	Basınç
$P_{ws}$	Doymuş buhar basıncı
q	Isı girişi
R	Sürüklenme oranı
SO <sub>2</sub>	Kükürt dioksit
SO <sub>x</sub>	Kükürt oksitleri
$t_g$	Gaz sıcaklığı
$T_{pre}$	Ön ısıtılmış hava sıcaklığı
U	Hız
$\dot{V}$	Hacimsel debi
W	Wobbe sayısı
$\lambda$	Hava fazlalık katsayısı
$\eta$	Boyutsuz basınç etkinliği
$\Phi$	Eşdeğerlik oranı



$\rho$  Yoğunluk  
 $\sigma$  Bağıl yoğunluk  
 $^{\circ}$  Derece

## KISALTMA LİSTESİ

---

CV	Calorific Value
DOE	Design of Experiments
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
Hz	Hertz
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
LHV	Low Heating Value
LPG	Liquefied Petroleum Gas
mbar	Milibar
PA <sub>c</sub>	Primary Air Cold (Soğuk deneyde sürüklenen birincil hava)
PA <sub>h</sub>	Primary Air Hot (Sıcak deneyde sürüklenen birincil hava)
PIV	Particle Image Velocimetry
THİ	Teorik Hava İhtiyacı

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Bazı gazların aldıkları birincil havaya göre yanma hızları..... 9
Şekil 2. 2	Metanın laminer yanma hızı ..... 10
Şekil 2. 3	Yanma hızı ile yanmamış karışım hızı arasındaki ilişki ..... 10
Şekil 2. 4	CH <sub>4</sub> ' ün tam yanması ..... 11
Şekil 2. 5	Yakıt - hava karışımı ve akış hareketine göre yanmanın sınıflandırılması ... 16
Şekil 2. 6	Ön karışimsız alev (difüzyon alevi) ..... 17
Şekil 2. 7	Kısmi ön karışimli yanma ve tam ön karışimli yanma şematik gösterimi .... 17
Şekil 3. 1	Tek alev halkalı geleneksel ev tipi yakıcı ..... 19
Şekil 3. 2	Geleneksel ev tipi yakıcıda yakıt girişi ve birincil hava emişi ..... 20
Şekil 3. 3	Birden fazla alev halkasına sahip yüksek güçlü ev tipi yakıcı ..... 20
Şekil 3. 4	Yüksek güçlü yakıcıda yakıt girişi ve birincil hava emişi ..... 21
Şekil 3. 5	Birden fazla alev halkasına sahip yüksek güçlü yakıcı ..... 21
Şekil 3. 6	Tipik bir enjektördeki boşaltım katsayısına Reynolds sayısının etkisi ..... 24
Şekil 3. 7	Kısmi ön karışimli yakıcı şematik gösterimi ..... 25
Şekil 3. 8	Birincil hava miktarına bağlı olarak oluşan durumlar ..... 31
Şekil 4. 1	Doğal emişli yakıcılarda birincil hava girişi ..... 33
Şekil 4. 2	Deney düzeneklerinin şematik gösterimi ..... 35
Şekil 4. 3	Sıcak ve soğuk deneylerde ölçülen oksijen oranları ..... 38
Şekil 4. 4	Tek porta sahip yakıcının port çıkışındaki hız profilleri ..... 38
Şekil 4. 5	Teorik ve deneysel birincil hava oranlarının karşılaştırılması ..... 39
Şekil 4. 6	$Mg = 0.0017 \text{ kg. m/s}^2$ için karışım sıcaklıkları ..... 39
Şekil 4. 7	Portların çıkışlarına yakın ortalama karışım sıcaklığı ..... 40
Şekil 4. 8	$Mg = 0.0303 \text{ kg. m/s}^2$ için basınç düşümleri ..... 40
Şekil 4. 9	Birincil hava oranının teorik ve deneysel karşılaştırılması ..... 41
Şekil 4. 10	Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması ..... 42
Şekil 4. 11	Deney düzeneğinin şematik gösterimi ..... 43
Şekil 4. 12	Sürüklenen birincil hava oranları ..... 44
Şekil 4. 13	$(T_{pre}/T_c)$ ' ye göre $m'$ in değişimi ..... 45
Şekil 4. 14	$(T_{pre}/T_c)$ ' ye göre $b'$ nin değişimi ..... 45
Şekil 4. 15	$PAh$ değerinin deneysel ve teorik olarak karşılaştırılması ..... 46
Şekil 4. 16	Isı girişine ve ön ısıtma durumuna göre ikincil hava oranları ..... 47
Şekil 4. 17	Isı girişine ve ön ısıtma durumuna göre toplam eşdeğerlik oranları ..... 48
Şekil 4. 18	Yakıcı sıcaklığının birincil hava sürüklenmesi üzerindeki etkisi ..... 48
Şekil 4. 19	Ventüri kanalının uzunluğuna göre sürüklenen birincil hava oranları ..... 50

Şekil 5. 1	Verim deneyinde 220 mm çapındaki tencereyle ön ısıtma .....	57
Şekil 5. 2	Verim deneyi düzeneği .....	57
Şekil 5. 3	Numune alma aparatının yerleşimi.....	60
Şekil 5. 4	CO-CO <sub>2</sub> Gaz analizörü.....	60
Şekil 5. 5	Emisyon deney düzeneğinin şematik gösterimi .....	62
Şekil 5. 6	Referans yakıcıdaki gaz girişi ve birincil hava emişi .....	64
Şekil 5. 7	Mini rüzgar tüneli.....	65
Şekil 5. 8	Hacimsel debi ölçümü için referans yakıcının bağlantısı .....	66
Şekil 5. 9	Tünele bağlanmış durumdaki referans yakıcı .....	66
Şekil 5. 10	Hacimsel debi ölçüm düzeneği .....	67
Şekil 5. 11	PIV sistemi ölçüm düzeneği şematik gösterimi .....	68
Şekil 5. 12	PIV sistemi ile akış görsellemesi yapılan referans yakıcı .....	69
Şekil 5. 13	PIV sistemi deney düzeneği .....	70
Şekil 5. 14	PIV sistemi ile akış görselleme .....	70
Şekil 5. 15	Kesit 1 ortalama hız dağılımları.....	71
Şekil 5. 16	Kesit 2 ortalama hız dağılımları.....	71
Şekil 5. 17	Kesit 3 ortalama hız dağılımları.....	71
Şekil 5. 18	Kesit 4 ortalama hız dağılımları.....	72
Şekil 6. 1	Referans yakıcının akış hacmi .....	74
Şekil 6. 2	Ortam havasıyla beraber tam akış hacmi .....	75
Şekil 6. 3	Ağ örgüsü bağımsızlığı.....	75
Şekil 6. 4	Referans yakıcıya uygulanan ağ örgüsü .....	76
Şekil 6. 5	Tüm akış hacmine uygulanan ağ örgüsü.....	76
Şekil 6. 6	Analiz modeli ve hız dağılımı incelenen kesitler .....	77
Şekil 6. 7	Kesit 1 ortalama hız dağılımları (Analiz sonucu – PIV sonucu) .....	77
Şekil 6. 8	Kesit 2 ortalama hız dağılımları (Analiz sonucu – PIV sonucu) .....	78
Şekil 6. 9	Kesit 3 ortalama hız dağılımları (Analiz sonucu – PIV sonucu) .....	78
Şekil 6. 10	Kesit 4 ortalama hız dağılımları (Analiz sonucu – PIV sonucu) .....	78
Şekil 6. 11	Referans yakıcı modeli sınır koşulları.....	79
Şekil 6. 12	Analiz sonucu referans yakıcıdaki hız vektörleri.....	80
Şekil 6. 13	Referans yakıcının ventüri kanalındaki CH <sub>4</sub> kütle oranı .....	80
Şekil 6. 14	Referans yakıcının ventüri kanalındaki O <sub>2</sub> kütle oranı .....	81
Şekil 6. 15	Enjektör geometrileri.....	82
Şekil 6. 16	Enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki .....	83
Şekil 6. 17	Ventüri kanalı boğaz uzunluğu .....	83
Şekil 6. 18	Karışım odası yüksekliği .....	83
Şekil 6. 19	Minitab üzerinden faktöriyel tasarımın seçilmesi .....	84
Şekil 6. 20	Analiz planının belirlenmesi.....	84
Şekil 6. 21	Analiz planında faktörlerin oluşturulması.....	85
Şekil 6. 22	Parametrik modellerin ventüri kanallarındaki kütle oranı.....	88
Şekil 6. 23	Parametrik modellerin ventüri kanallarındaki kütle oranı.....	90
Şekil 6. 24	Fluent programında yanma analizi için kullanılan modeller.....	92
Şekil 6. 25	Belirlenen yakıcıda yanma analizi sonucu meydana gelen sıcaklıklar.....	92
Şekil 6. 26	Belirlenen yakıcıda yanma analizi sonucu meydana gelen sıcaklıklar.....	92
Şekil 7. 1	Sürüklenme oranı üzerine etki eden parametrelerin analiz sonuçları .....	95
Şekil 7. 2	İncelenen parametrelerin sürüklenme oranı üzerindeki etkileri.....	96

Şekil 7. 3	İncelenen parametrelerin ana etki grafiği .....	97
Şekil 7. 4	Çoklu değişken grafiği .....	97

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1	Bazı gazların yanabilirlik sınırları (% hacimsel olarak).....	8
Çizelge 2. 2	15°C sıcaklık ve 1 atm basınçta bazı gazların fiziksel özellikleri.....	14
Çizelge 4. 1	Enjektör tiplerine göre boşaltım katsayıları.....	14
Çizelge 5. 1	Wobbe sayısına göre gaz ailelerinin sınıflandırılması .....	14
Çizelge 5. 2	Farklı deney gazlarının ana özellikleri ve bileşimleri.....	53
Çizelge 5. 3	Deney gazlarının basınçları .....	54
Çizelge 5. 4	Deney gazları için CO <sub>2</sub> hacimsel yüzdesi .....	61
Çizelge 5. 5	Yanma ürünlerinde bulunabilecek azami CO miktarı .....	62
Çizelge 5. 6	Referans yakıcının deney sonuçları.....	63
Çizelge 6. 1	Parametrik analiz planı .....	85
Çizelge 6. 2	Farklı geometrilere yapılan analizlere göre sürüklenme oranları.....	91

## YAKICIDA HAVA YAKIT KARIŞIMININ PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mustafa ÖNAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özden AĞRA

İnsanların ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılan ve günlük hayatın vazgeçilmez bir unsuru olan enerji aynı zamanda ülke ekonomisi için de önemli bir unsurdur. Artan enerji kullanımıyla birlikte sürdürülebilir kalkınma için enerji ve çevre ilişkisi oldukça önemli bir hal almaktadır. Enerji kullanımının artmasına paralel olarak çevreye verilen zarar da artmaktadır. Özellikle fosil yakıtların yakılması sonucu çevreye salınan emisyonlar çevre kirliliğinin başlıca kaynağıdır. Son yıllarda konut, sanayi ve sosyal tesislerde doğalgazın kullanımı yaygınlaşmıştır. Enerji fiyatlarının da giderek yükselmesi bu yakıtın uygun sistemlerle verimli bir şekilde kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle doğalgazın yanmasında verimin yüksek, yakıt tüketiminin ve emisyon değerlerinin de optimum noktalarda olmasına önem verilmelidir.

Bu çalışmada üzerinde durulan ev tipi yakıcılar kısmi ön karışimli yakıcılardır. Ev tipi yakıcılarda emisyon değerlerinin azaltılıp verimli bir yanma gerçekleştirilebilmesi için yanma işlemi esnasında yeterli birincil havanın alınması gerekmektedir. Yapılan literatür araştırmasına göre birincil hava emişine etki eden parametreler yakıt tipi, yakıt debisi, enjektör, enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe, ventüri kanalı, karışım odası, yakıcı portları ve ortam sıcaklığıdır. Bu çalışmada bu parametrelerden enjektör çıkış açısı, enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe, ventüri boğazı uzunluğu ve karışım odasının birincil hava emişine olan etkileri HAD analizleri ile nümerik olarak incelenmiştir. Parametrelerin etkileri nümerik olarak belirlendikten sonra uygun birincil

hava emişini sağlayacak bir yakıcı tasarımı yapılmıştır ve referans olarak belirlenen yakıcı ile deneysel olarak (verim ve emisyon deneyi) karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Ev tipi yakıcı, birincil hava, yanma, emisyon, verim, HAD



---

**INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE EFFECT OF AIR FUEL MIXTURE  
ON BURNER**

Mustafa ÖNAL

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Özden AĞRA

Energy is an indispensable element of daily life used to meet people's needs. It is also an important element for the country's economy. Along with increased energy use, the energy and environment relationship is becoming very important for sustainable development. Parallel to the increase in energy use, damage to the environment is also increasing. Especially the emission of fossil fuels is the main source of environmental pollution. In recent years, the use of natural gas has become widespread in residential, industrial and social facilities. Increasing energy prices make it necessary to use this fuel efficiently with appropriate systems. For this reason, when natural gas burns, efficiency is high, fuel consumption and emission values must be at optimum points.

The domestic gas burners that are discussed in this study are partially premixed burners. Sufficient primary air must be taken during the combustion process in order to reduce the emission values and achieve efficient combustion in domestic gas burners. According to the literature survey, parameters that affect primary air entrainment are fuel type, fuel flow rate, injector, distance between injector and venturi channel intake, venturi channel, mixing chamber, burner ports and ambient temperature. In this study, the effects of the injector outlet angle, the distance between the injector and the venturi tube inlet, the length of the venture tube throat and mixing chamber on the primary air intake of the were numerically analyzed by CFD analysis. After the effects of the parameters have been determined numerically, a burner design has been made to provide the appropriate primary air entrainment. Then compared with the reference burner experimentally (efficiency and emission test)

**Keywords:** Domestic gas burner, primary air, combustion, emission, efficiency, CFD

#### 1.1 Literatür Özeti

İnsanların ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılan ve günlük hayatın vazgeçilmez bir unsuru olan enerji aynı zamanda ülke ekonomisi için de önemli bir unsurdur. Artan enerji kullanımıyla birlikte sürdürülebilir kalkınma için enerji ve çevre ilişkisi oldukça önemli bir hal almaktadır. Enerji kullanımının sürekli olarak artmasıyla doğal çevreye verilen zarar da artmaktadır. Özellikle fosil yakıt kullanımı çevreye verilen zararın önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Fosil yakıtların yakılması sonucu çevreye salınan emisyonlar çevre kirliliğinin başlıca kaynağıdır.

Son yıllarda konut, sanayi ve sosyal tesislerde doğalgazın kullanımı yaygınlaşmıştır. British Petrol Dünya Enerji İstatistikleri raporuna göre 2015 yılında küresel doğalgaz tüketimi, bir önceki yıla göre %0,5 artarak birincil enerji tüketiminin %23,8' ini oluşturmaktadır. Türkiye' nin ise küresel doğalgaz tüketiminde %1,3' lük bir paya sahip olduğu da belirtilmektedir. Ayrıca raporda dünyadaki doğalgaz tüketiminin ivmeli bir şekilde artış gösterdiğine de dikkat çekilmektedir. Rapora göre dünyadaki doğalgaz tüketimi 2015 yılında %1,7 artmıştır. [1]

2017 yılında yayınlanan British Petrol Enerji Görünümü raporuna göre küresel enerji talebi 2035' e kadar yaklaşık %30 artacak. Rapora göre, doğalgazın petrol ve kömüre göre çok daha hızlı gelişme göstereceği ve yıllık ortalama %1,6 talep artışıyla büyüyeceği öngörülmektedir. Doğalgaz kullanımının artması ile birlikte karbon emisyonlarının da yıllık ortalama %0,6 oranında artacağı düşünülmektedir. [2]

Enerji fiyatlarının da giderek yükselmesi bu yakıtın uygun sistemlerle verimli bir şekilde kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle doğalgazın yanmasında verimin yüksek, yakıt tüketiminin ve emisyon değerlerinin de optimum noktalarda olmasına önem verilmelidir. Emisyon değerlerinin azaltılıp verimli bir yanma gerçekleştirilebilmesi için yanma işlemi esnasında yeterli birincil havanın alınması gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada, ev tipi bir yakıcıda enjektör çıkış açısı, enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe, ventüri kanalı boğaz uzunluğu ve karışım odasının birincil hava emişi üzerindeki etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca referans bir yakıcı ile nümerik çalışma sonucu belirlenen uygun boyutlardaki yakıcının verim ve emisyon değerleri deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu tezin amacı; ev tipi bir yakıcıda enjektör çıkış açısı, enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe, ventüri kanalı boğaz uzunluğu ve karışım odası hacminin birincil hava emişi üzerindeki etkilerinin nümerik olarak incelenmesidir. Parametrelerin birincil hava emişi üzerindeki etkileri HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) aracılığı ile belirlendikten sonra uygun birincil hava emişini sağlayacak bir ev tipi yakıcı tasarımı hedeflenmiştir. Bu kapsamda yakıcıya Fluent programıyla parametrik soğuk akış analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucu dört farklı parametrenin birincil hava emişi üzerindeki etkileri belirlenmiş ve en iyi hava emişini sağlayan optimum boyutlara karar verilmiştir. Referans durumdaki yakıcı ile nümerik çalışmalar sonucu belirlenen optimum boyutlardaki yakıcıya tam yanma analizi yapılarak da iki yakıcı karşılaştırılmıştır. Son olarak da belirlenen optimum boyutlardaki yakıcının üretimi gerçekleştirilmiş ve referans yakıcı ile deneysel olarak standart verim ve emisyon deneyleri yapılarak karşılaştırılmıştır.

## **1.3 Hipotez**

Ön karışimli bir yakıcıda, yakıcıya alınan birincil hava miktarının değişmesiyle hava – yakıt karışım oranı da değişmektedir. Bu oranın değişmesiyle yakıcının verim ve emisyon değerlerinin de doğrudan etkileneceği düşünülmüştür. Bu bakımdan ev tipi bir yakıcıda enjektör çıkış açısı, enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe, ventüri kanalı

boğaz uzunluğu ve karışım odasının birincil hava emişi üzerindeki etkileri nümerik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Yapılan nümerik çalışmalar sonucu optimum birincil hava emişi sağlayacak uygun boyutlarda ev tipi bir yakıcı tasarlanmıştır. Referans yakıcı ile tasarlanan yakıcının verim ve emisyon değeri deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

### YANMANIN TEMELLERİ

Yanma, yakıtın oksijenle girdiği tepkime sonucu ısı açığa çıkan kimyasal bir olaydır. Bu tepkime sırasında yakıtın içindeki kimyasal enerji açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan bu enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüşmektedir. Isı enerjisine dönüşen kısmın dışında geriye kalan küçük kısmı ise elektromanyetik dalgalar (ışık), elektrik ve mekanik enerji (ses) şeklinde çevreye yayılmaktadır. Ancak açığa çıkan toplam enerji içindeki paylarının çok az olması sebebiyle tepkime sonunda açığa çıkan elektromanyetik, elektrik ve mekanik enerji ihmal edilmektedir. Yanma işleminde tepkimeden önce bulunan bileşenlere tepkimeye girenler, tepkimeden sonra oluşan bileşenlere de ürünler denir. [3]

Kimyasal tepkimelerde denklik kütlenin korunumu ilkesine dayanarak yapılmaktadır. Kütlenin korunumu ilkesine göre tepkime sonucu oluşan ürünlerdeki her bir elementin toplam kütlesi, tepkimeye giren o elementin toplam kütlesine eşit olması gerekmektedir. Ayrıca bir elementin atom sayısı, elementin toplam kütlesinin atom kütlesine bölümü olduğu için, kimyasal bir tepkime esnasında elementin toplam atom sayısı da sabit kalmaktadır. [4]

#### 2.1 Yanmanın Temelleri

Yanma işleminin gerçekleşebilmesi için 3 temel koşul vardır.

- Hava - yakıt karışımı
- Tutuşma sıcaklığı
- Zaman

### 2.1.1 Hava-Yakıt Karışımı

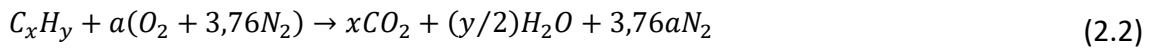
Teorik olarak bir yakıtın tam yanması için gerekli olan en az hava miktarına stokiometrik hava ve bu şekilde olan yanma işlemine de stokiometrik yanma denir. Bir yanma işleminin başlayıp gerçekleşebilmesi için en önemli unsur hava - yakıt karışımıdır. Yanma işleminin tam olarak sağlanabilmesi için hava ve yakıtın iyi bir şekilde karışım oluşturması gerekmektedir. Aynı zamanda karışım hızı da yanma işlemi için önemlidir. Yanmanın tama yakın olmasını sağlamak ve sıcaklığı kontrol edip belirli bir düzeyde tutabilmek için gerçek yanma işlemlerinde stokiometrik miktardan biraz daha fazla hava kullanılmaktadır. Stokiometrik miktardan daha fazla olarak kullanılan bu havaya fazla hava denir. Yanmada kullanılan hava miktarı, hava fazlalık katsayısı  $\lambda$  ile gösterilebilmektedir. Gerçek hava - yakıt oranının stokiometrik hava - yakıt oranına bölünmesiyle (2.1) hava fazlalık katsayısı bulunmaktadır.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{hava}}{\dot{m}_{hava, stokiometrik}} \times 100 \quad (2.1)$$

Yanma işleminde kullanılan havaya göre yanma olayı 4 bölümden oluşmaktadır. [5]

#### 2.1.1.1 Teorik (Stokiometrik) Yanma

Teorik olarak bir yakıtın tam yanmasına stokiometrik veya teorik yanma denir. Stokiometrik yanma işleminde yanmamış yakıt bulunmamakta ve yanma sonu ürünlerinde serbest oksijene rastlanmamaktadır. Stokiometrik yanmada hava fazlalık katsayısı  $\lambda=1'$  dir. Hidrojen ve karbon kaynaklı yakıtlara hidrokarbon yakıtlar denir ve  $C_xH_y$  genel formülü ile gösterilirler. Hidrokarbon yakıtların stokiometrik yanma denklemi şu şekildedir:



Burada;

$$a = x + y/4$$

olmaktadır. Mol veya hacimce kuru hava %20,9  $O_2$ , %78,1  $N_2$ , %0,9 argon ve az miktarda da karbondioksit, helyum, neon ve hidrojenen meydana gelmektedir. Yanma işlemi

incelenirken havadaki argon azot olarak işlem görmekte ve eser miktarda bulunan diğer gazlar da göz ardı edilmektedir. Bu durumda kuru hava molce yaklaşık %21 O<sub>2</sub> ve %79 N<sub>2</sub>' den ibarettir. Böylece her bir O<sub>2</sub> molü için 0,79/0,21 = 3,76 mol N<sub>2</sub> bulunmaktadır. [4]

1 kmol O<sub>2</sub> + 3,76 kmol N<sub>2</sub> = 4,76 kmol hava

Bu durumda stokiometrik hava - yakıt oranı şu şekilde bulunabilmektedir;

$$(A/F)_{stoic} = \left( \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} \right)_{stokiometrik} = \frac{4,76a M_{hava}}{1 M_{yakıt}} \quad (2.3)$$

Burada  $M_{hava}$  ve  $M_{yakıt}$  sırasıyla havanın ve yakıtın moleküler ağırlığıdır.

Yanma işlemlerinde kullanılan gerçek yakıt - hava oranının stokiometrik yakıt - hava oranına bölümü eşdeğerlik oranı ( $\Phi$ ) olarak adlandırılmaktadır. Eşdeğerlik oranı sayesinde yakıt - hava karışımının yakıtça zengin, fakir ya da stokiometrik olduğu belli olmaktadır.

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4)' de F yakıtı, A ise havayı ifade etmektedir. Eşdeğerlik oranı  $\Phi > 1$  olduğu durumda yakıtça zengin,  $\Phi < 1$  olduğu durumda ise yakıtça fakirdir.  $\Phi = 1$  durumunda da stokiometrik karışım olmaktadır. Çoğu yanma uygulamalarında sistem performansını belirlemek için eşdeğerlik oranı önemli bir faktördür. [6]

### 2.1.1.2 Tam Yanma

Hava miktarı teorik olarak gerekli hava miktarından fazla olduğunda (hava fazlalık katsayısı  $\lambda > 1$ ) egzozda O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> görülmektedir. Yanma işleminde tüm karbon yanarak CO<sub>2</sub>' ye, tüm hidrojen yanarak H<sub>2</sub>O' ya ve eğer varsa tüm kükürt yanarak SO<sub>2</sub>' ye dönüşürse yanma tamdır. Böylece tam yanma işlemi sırasında yakıtın tüm yanabilen bileşenleri tamamen yanmaktadır.



### **2.1.1.3 Eksik Yanma**

Teorik olarak tam yanmanın gerçekleşmesi için gerekli olan minimum havadan daha az hava ile meydana gelen yanmaya eksik yanma denir. Yanma işleminin tam olmamasından dolayı yanma sonu ürünlerinde C, H<sub>2</sub>, CO ve OH bulunan yanma şeklidir. Yakıt moleküllerinin oksijen molekülleriyle tam olarak buluşmadığı durumlarda eksik yanma gerçekleşmektedir. Hava fazlalık katsayısı  $\lambda < 1$  durumundadır. Bu tür yanma işleminde salınan ısı düşmekte, yakıtın ısı tam olarak kullanılamamakta ve verim düşmektedir.

### **2.1.1.4 Kısmi Eksik Yanma**

Hava fazlalık katsayısının  $\lambda > 1$  olmasına rağmen yanma işlemi sonucunda C, H<sub>2</sub>, CO ve OH gibi bileşenlerin görülmesi durumudur. Bu durumun bir nedeni yakıt ve oksijenin temas ettiği sınırlı süre içinde yanma odasında yeterli karışım oluşturamamasıdır. Diğer bir nedeni de yüksek sıcaklıklarda önemli olan ayrışmadır.

### **2.1.2 Tutuşma Sıcaklığı**

Yanma işleminin başlayıp gerçekleşmesi için yakıt moleküllerinin oksijen molekülleriyle buluşmasının yanı sıra yakıtın en az tutuşma sıcaklığında da olması gerekmektedir. Yanmanın başlaması için yakıt tutuşma sıcaklığının üstüne getirilmelidir. Bazı maddelerin atmosferik havada minimum tutuşma sıcaklıkları yaklaşık olarak benzinin 260°C, karbonun 400°C, hidrojenin 580°C, karbon monoksitin 610°C ve metanın 630°C şeklindedir. [4]

### **2.1.3 Zaman**

Yanma işleminin tam olarak gerçekleşebilmesi için yakıt moleküllerinin oksijen molekülleriyle yakıtın minimum tutuşma sıcaklığında buluşması gerekmektedir. Ayrıca uygun hava - yakıt karışımına ve tutuşma sıcaklığına ek olarak yakıt ve oksijenin tepkimelerini tamamlayabilmeleri için yeterli süreye ihtiyaç duymaktadırlar. Böylece uygun hava ile yakıtın, en az yakıtın tutuşma sıcaklığında ve yeterli sürede bir araya gelmesiyle yanma işlemi başlayıp tamamlanabilmektedir.

## 2.2 Yanma Özellikleri

Yanmanın fiziksel özelliklerinin ayrıntılı analizi yapılmadan önce anlaşılması gereken bazı önemli kavramlar vardır. İlk olarak ateşlenmenin yapılabilmesi için yakıt-hava karışımındaki yakıt konsantrasyonunun belli bir değer aralığında olması gerekmektedir. Bu değer aralığına yanabilirlik sınırı denir. İkinci olarak yanabilir karışıma belli bir enerji verilerek ateşleme gerçekleştirilmektedir. Son olarak da ilk kıvılcım verildikten sonra oluşan alev yanma hızıyla yanmamış karışıma doğru yayılmaktadır. Yanma hızı yakıcılardaki alev kararlılığı için son derece önemli bir parametredir.

### 2.2.1 Yanabilirlik Sınırı

Yakıt-hava karışımındaki yakıt konsantrasyonu yanabilirlik sınırının dışında bir değerde olduğu zaman ateşleme meydana gelmemektedir. Yanma işleminde kimyasal tepkimelerin görülebilmesi için yakıt ve oksijen moleküllerinin reaktif çarpışmalar sergilemesi gerekmektedir. Eğer karışımda yakıt miktarı çok az, oksijen miktarı da çok fazla ise yakıt ve oksijen moleküllerinin reaktif çarpışmaları çok seyrek olmaktadır.

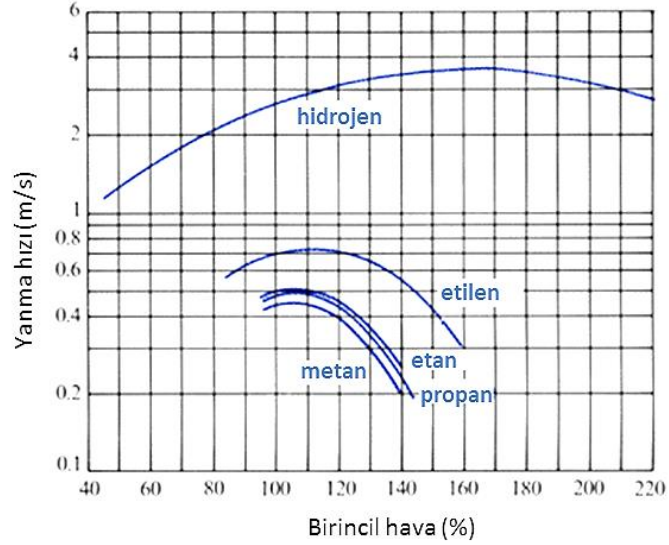
Yanabilirlik limiti gaz bileşenleri, sıcaklık ve basınç gibi faktörlere bağlıdır. Çizelge 2.1' de bazı gazların 25°C sıcaklık ve atmosfer basıncında yanabilirlik limitleri listelenmektedir.

Çizelge 2.1 Bazı gazların yanabilirlik sınırları (% hacimsel olarak)

<b>GAZLAR</b>	<b>Asgari</b>	<b>Azami</b>
<i>Hidrojen</i>	4,0	75
<i>Metan</i>	5,0	15
<i>Etan</i>	3,0	12,4
<i>Propan</i>	2,1	9,5
<i>Bütan</i>	1,8	8,4
<i>Etilen</i>	2,7	36
<i>Propilen</i>	2,4	11
<i>Bütilen</i>	1,7	9,7

## 2.2.2 Yanma Hızı

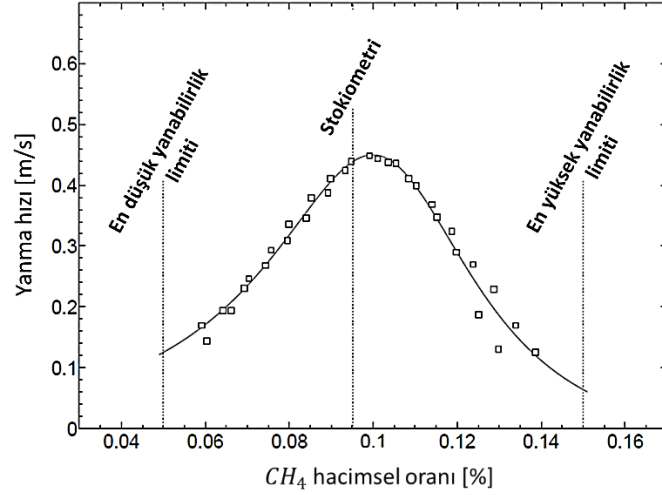
Yakıt - hava karışımı ateşlendiği zaman, alev karışım bileşimi, sıcaklık ve basınca bağlı olarak kalan yanmamış gazlara doğru yayılmaktadır. Yanma hızı karışımın ana özelliğidir ve alevin içindeki kimyasal reaksiyonlarla bağlantılıdır. Yanma hızı, bir boyutlu alevin yanmamış gaz karışımına doğru ilerlediği alevin önündeki normal hız olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.1 Bazı gazların aldıkları birincil havaya göre yanma hızları

Yanma hızı büyük oranda gaz bileşenlerine bağlıdır. Yanma hızı en düşük yanabilirlik limitinde sıfırdan başlayarak stokiometrik noktanın yakınlıklarına kadar sürekli artmaktadır. Şekil 2.1 'de de görüldüğü gibi stokiometrik noktanın yakınlıklarında yanma hızı en büyük değerini almaktadır. [7]

Warnatz [8] tarafından deneysel olarak yapılan çalışmada farklı  $CH_4$  hacimsel oranlarında metanın laminer yanma hızı belirlenmiştir. Şekil 2.2' de deney sonuçlarından elde edilen yanma hızları grafik halinde gösterilmiştir. Bu grafiğe göre stokiometrik nokta civarında metanın yanma hızı en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Yanabilen en düşük metan hacimsel oranı %5 olarak görülürken, en yüksek metan oranı da %15 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 2.1' de gösterilen metanın hacimsel yanma aralığını doğrulamaktadır.



Şekil 2.2 Metanın laminer yanma hızı

### 2.2.3 Alev Kararlılığı

Alev sürekliliğinin sağlanması ve durağan bir şekilde görünmesi için denge durumunun sağlanması gerekmektedir. Bu denge durumu alevin yanmamış karışıma doğru yayılmasıyla oluşan yanma hızı ile yanmamış gazların akışından oluşan karışım hızı arasında olmaktadır.



Şekil 2.3 Yanma hızı ile yanmamış karışım hızı arasındaki ilişki

Şekil 2.3' de görüldüğü gibi bir noktadaki yanma hızı o noktadaki karışım hızının bileşenine eşit olduğu zaman denge sağlanmaktadır. Eğer yanma hızı ya da karışım hızından biri değişirse denge konumunu tekrar sağlamak için alevin şekli değişmektedir. Alev kararlığı yakıcı tasarımı yaparken göz önünde bulundurulması gereken önemli bir parametredir. Eğer karışım hızı çok yüksek ya da yanma hızı çok düşükse alevde kopmalar görülmektedir. Bu durumda alev yakıcıdan uzaklaşmakta ve sönmektedir. Aksine karışım hızı çok düşük ya da yanma hızı çok yüksek olduğu durumda da alev yakıcının içine doğru ilerlemekte ve alevde geri tepme meydana gelmektedir. Oluşan her

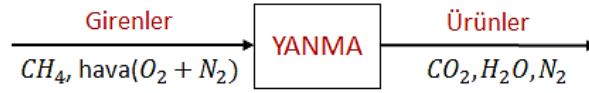
iki durum da performansı kötü yönde etkilemekte ve bazen de tehlikeli hale gelebilmektedir.

### 2.3 Yakıt Özellikleri

Yanabilirlik özelliği olup yandıktan sonra ısı enerjisi veren maddelere yakıt denir. Hidrojen ve karbon kaynaklı yakıtlara da hidrokarbon yakıtlar adı verilir. Hidrokarbon yakıtlar  $C_nH_m$  genel formülü ile gösterilmektedirler. Gaz hidrokarbon yakıtlardan olan doğalgazın (G20 gazı) büyük çoğunluğu metandan oluşmaktadır. Metanın haricinde içeriğinde çok az miktarda etan, propan, hidrojen, helyum, karbon dioksit, azot, hidrojen sülfür ve su buharı da bulunmaktadır. Ancak metanın haricinde çok az miktarda bulunan bu gazlar genelde ihmal edilerek doğalgaz metan ( $CH_4$ ) gazı olarak düşünülmektedir. Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) ise genellikle %70 bütan, %30 propan içermektedir.

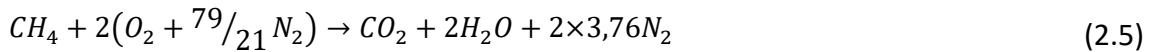
#### 2.3.1 Metanın Yanması

Hava (molce %21 oksijen, %79 nitrojen) ile birlikte metanın tam yanması sonucu karbondioksit ve su buharı oluşmaktadır.



Şekil 2.4  $CH_4$ ' ün tam yanması

Şekil 2.4' de de görüldüğü gibi metanın stokiometrik yanması



şeklinde olmaktadır.

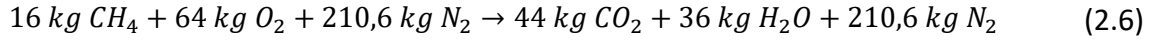
Birim yakıtı stokiometrik olarak yakmak için gerekli olan hava miktarını teorik hava ihtiyacı (THİ) olarak tanımlayabiliriz.

$CH_4$ ' ün stokiometrik yanması için hacimsel olarak teorik hava ihtiyacı (THİ<sub>v</sub>):

$$THI_v = \frac{2(1 + 3,76)}{1} = 9,52$$

olmaktadır. Yani 1 litre CH<sub>4</sub>' ü stokiometrik olarak yakmak için 9,52 litre hava gerekmektedir.

Aynı zamanda kimyasal denklemlerde tepkimeye giren ve tepkimedenden çıkan kütleler birbirine eşit olmalıdır. (Kütlenin korunumu) Bu nedenle kimyasal denklemler kütleli olarak da yazılabilmektedir. Böylece Eşitlik (2.5)' i şu şekilde de yazabilmekteyiz.



Bu durumda CH<sub>4</sub>' ün stokiometrik yanması için kütleli olarak teorik hava ihtiyacı (THİ<sub>m</sub>) da bulunabilmektedir.

$$THİ_m = \frac{2(32 + 105,3)}{1 \times 16} = 17,16$$

Burdan çıkan sonuca göre de 1 kg CH<sub>4</sub>' ü stokiometrik olarak yakmak için 17,16 kg havaya ihtiyaç duyulmaktadır. [9]

### 2.3.2 Zararlı Yanma Sonu Ürünleri

Yanma sonucunda ortaya çıkan 3 önemli partikül karbon emisyonları (CO, CO<sub>2</sub>), nitrojen oksitleri (NO<sub>x</sub>) ve kükürt oksitleri (SO<sub>x</sub>) dir. Ev tipi ocaklarda yakılan gazlar neticesinde oluşan karbon emisyonları büyük önem taşımaktadır. Bu emisyonlar insan sağlığı ve çevre açısından istenmeyen ürünlerdir.

Karbon monoksitin (CO) esas oluşma nedeni oksijen miktarının yetersiz oluşu ya da düşük alev sıcaklıkları yüzünden meydana gelen tamamlanmamış yanmadır. CO renksiz, kokusuz ve oldukça zararlı bir gazdır. Solunan havada CO bulunuyorsa kana kolayca geçer ve oksijenin taşıdığı hemoglobine oksijenden daha kolay bağlanır. Böyle bir durumda dokulara oksijen taşınmaz ve hücre ölümleri meydana gelir. CO emisyonlarını etkileyen ana parametre hava - yakıt karışımıdır. CO, son ürünün CO<sub>2</sub> olduğu hidrokarbon oksidasyon prosesinde bir ara kademedir. Zengin karışımlarda yakıtta göre oksijenin eksik oluşu eksik yanmaya sebep olmakta ve CO konsantrasyonunu arttırmaktadır. Bu bakımdan yakıtta göre izin verilen en yüksek CO emisyon miktarı da standartlarda belirtilmektedir. Ev tipi yakıcılarda da standartlarda belirtilen en yüksek emisyon

değerlerinin üzerine çıkılması durumunda yakıcıların piyasaya sürülmesine izin verilmemektedir.

Karbondiyoksit (CO<sub>2</sub>) ise içeriğinde karbon bulunan yakıtların normal son yanma ürünüdür. Karbon içerikli yakıtların yanması sonucu oluşan CO<sub>2</sub> hava kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca atmosferde yükselerek sera etkisine de yol açmaktadır. Yer yüzünden yansıyan güneş ışınları başta karbondiyoksit, metan ve su buharı olmak üzere atmosferde bulunan gazlar tarafından tutulmaktadır. Atmosferden çıkamayan bu ışınlar nedeniyle de dünya sürekli olarak ısınmaktadır. Yeryüzünden yansıyan bu ışınların atmosferde bu gazlar tarafından tutulmasına sera etkisi denir. Son dönemlerde sera etkisinin daha da ön plana çıkmasıyla CO<sub>2</sub> emisyonları da son derece önemli bir hale gelmiştir.

### 2.3.3 Gaz Karışımlarının Özellikleri

Ev tipi yakıcılarda kullanılan gazlar tek bileşenden daha çok farklı bileşenlerin çeşitli karışımlarıyla elde edilmektedir. Bu bakımdan yakıcı tasarımcılarının da kullanılabilecek karışımların özelliklerini iyi bilmeleri gerekmektedir.

Karışımın yoğunluğu, ısı değeri ve teorik hava ihtiyacı aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$P = \sum_i x_i P_i \quad (2.7)$$

Burada  $P$  karışım için parametre,  $x_i$   $i$  bileşeninin mol kesri ve  $P_i$   $i$  bileşeninin parametresinin değerini göstermektedir.

Doğalgaz, LPG ve hava gazı gibi gaz yakıtların gaz basınçları ve transfer özellikleri gibi sınıflandırmalar için kullanılan bir değer olan Wobbe sayısı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$W = \frac{\text{Karışımın ısı değeri}}{\sqrt{\text{Karışımın bağıl yoğunluğu}}} = \frac{\sum_i x_i CV_i}{\sqrt{\sum_i x_i \sigma_i}} \quad (2.8)$$

CV birim hacimdeki gazın ısı değeri,  $\sigma$  (bağıl yoğunluk) ise aynı basınç ve sıcaklıkta eşit hacimdeki kuru gazın yoğunluğunun kuru havanın yoğunluğuna oranıdır. [7]

Burada dikkat edilecek husus bileşenlerin Wobbe sayıları toplamı karışımın Wobbe sayısına eşit değildir.

$$W \neq \sum_i x_i W_i$$

Enjektörden geçen hacimsel debi ( $\dot{V}$ ), gaz basıncı ( $P$ ), bağıl yoğunluk ( $\sigma$ ) ve enjektör deliğinin alanıyla ( $A$ ) orantılıdır.

$$\dot{V} \propto \frac{A\sqrt{P}}{\sqrt{\sigma}} \quad (2.9)$$

Yakıcılara gönderilen yakıtın ısı değeri ile hacimsel debisinin çarpımı ısı girişini vermektedir. O halde ısı girişi:

$$q = CV \cdot \dot{V} \propto \frac{CV}{\sqrt{\sigma}} A\sqrt{P} \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

Böylece sabit basınçta belirli boyutta bir enjektör deliği düşünüldüğünde ısı girişi direk olarak Wobbe sayısı ile orantılı olmaktadır. Çizelge 2.2 15°C sıcaklık ve 1 atm basınçta genel olarak kullanılmakta olan gazların yoğunluk, bağıl yoğunluk, ısı değeri, Wobbe sayısı ve hacimsel teorik hava ihtiyacı değerlerini göstermektedir. [7]

Çizelge 2.2 15°C sıcaklık ve 1 atm basınçta bazı gazların fiziksel özellikleri

GAZLAR	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Bağıl Yoğunluk (Hava=1)	Isıl Değer (MJ/m <sup>3</sup> )	Wobbe Sayısı (MJ/m <sup>3</sup> )	TH <sub>v</sub>
<b>Hidrojen</b>	0,085	0,070	12,10	45,86	2,38
<b>Metan</b>	0,679	0,554	37,71	50,68	9,52
<b>Etan</b>	1,272	1,038	66,07	64,86	16,67
<b>Propan</b>	1,865	1,522	93,94	76,15	23,81
<b>Bütan</b>	2,458	2,006	121,80	86,00	30,95



<b>Etilen</b>	1,186	0,968	59,72	60,69	14,29
<b>Propilen</b>	1,780	1,452	87,09	72,27	21,43
<b>Bütilen</b>	2,373	1,936	114,62	82,37	28,57
<b>Karbon Monoksit</b>	1,185	0,967	11,97	12,17	2,38
<b>Karbondioksit</b>	1,861	1,519	0	0	0
<b>Nitrojen</b>	1,185	0,967	0	0	0

#### 2.4 Alev Yapıları

Yanma işlemi arka arkaya meydana gelen kimyasal tepkimelerden oluşmaktadır. Bu kimyasal tepkimeler esasen çok ince bir tabaka içinde gerçekleşmektedir. Bu tabakaya alev adı verilir. Alev yapısının çok karmaşık olması yanma işleminin anlaşılmasını da güç bir hale getirmektedir. Alevde bir tarafta yanıcı olarak yakıt bulunurken diğer tarafta da yakıcı olarak oksijen bulunmaktadır. Yine aynı ortamda yakıt ve oksijenin kimyasal tepkimesi sonucu oluşan gazlar da yer almaktadır. Tepkime sonucu oluşan ve özellikle de yanmayan gazlar yakıt moleküllerinin oksijen molekülleriyle buluşmasını zorlaştırmaktadırlar. Gazların hareketleri ve bölgesel derişikliklerinin farklı olması alev içinde ısı transferi ile birlikte kütle ve momentum transferini de ön plana çıkarmaktadır.

Yanma, yakıt ile havanın karışımına göre ön karışimsız ve ön karışimli olarak sınıflandırılır. Yakıt yanma odasına enjekte edildikten sonra atmosfere açılana kadar hiçbir şekilde hava ile buluşmayıp atmosfere açıldıktan sonra hava ile buluşup tutuşturuluyorsa buna ön karışimsız yanma denir. Eğer enjekte edilen yakıt port çıkışıyla atmosfere açılmadan önce hava ile buluşup karışiyorsa buna da ön karışimli yanma denir. Ön karışimli yanma da esas olarak iki kısımda incelenebilir. Yakıt port çıkışıyla atmosfere açılmadan önce buluşup karıştığı hava yanma için yeterli olup stokiometrik yanmayı gerçekleştirebiliyor ise tam ön karışimli yanma, önceden buluştuğu bu hava yeterli olmayıp daha sonra atmosfere açıldığında da tam yanmayı gerçekleştirebilmek için eksik olan havayı alıyorsa kısmi ön karışimli yanma olmaktadır.



Şekil 2.5 Yakıt - hava karışımı ve akış hareketine göre yanmanın sınıflandırılması

Alev adı verilen yanmanın gerçekleştiği bölgede esas olarak birkaç bölgeden oluşmaktadır.

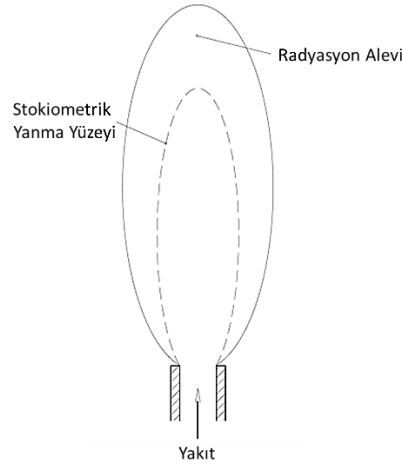
- Karışımın yakıtça fazla zengin olması nedeniyle yanmanın gerçekleşmediği yakıtça zengin karışım bölgesi. Bu bölgede yakıt yanabilirlik sınırına girebilecek şekilde yeterli hava ile buluşmamıştır. Alevin rengi koyu lacivettir.
- Karışımın yakıtça biraz fakirleşmesi sonucu yakıtın yanabilirlik sınırına girmesiyle yanmanın başladığı yakıtça zengin yanma bölgesi.
- Yakıt - hava karışımının yanma için ideal orana ulaşması sonucu meydana gelen stokiometrik yanma bölgesi. Bu bölgedeki yanma tamdır. Bu yüzden alevin en sıcak ve en verimli bölgesidir. Alevin rengi parlak açık mavidir.
- Yakıt - hava karışımının yakıtça fakirleşmesiyle oluşan eksik yanma bölgesi. Karışımın etraftaki hava ile daha çok temas etmesi sonucu karışım oksijence zenginleşmekte, yakıtça da fakirleşmektedir. Eksik yanma bölgeleri diğer bölgelerle karşılaştırıldığında oldukça büyük yer kaplamaktadır.

#### 2.4.1 Ön Karışimsız Yanma

Yakıt yanma odasına enjekte edildikten sonra atmosfere açılana kadar hiçbir şekilde hava ile temas etmeyip atmosfere açıldıktan sonra yanıyorsa bu tür bir yanmaya ön karışimsız yanma denir. Yanma ile oluşan aleve de ön karışimsız alev ya da difüzyon alevi adı verilir.

Ön karışimsız yanmada yakıt ve hava karışımının düzgün olmamasından dolayı yanmamış karbon parçacıkları (kurum) fazla miktarda görülmektedir. Meydana gelen tepkimeler neticesinde alevin rengi sarı olmaktadır. Ön karışimsız yanma akış hareketine göre

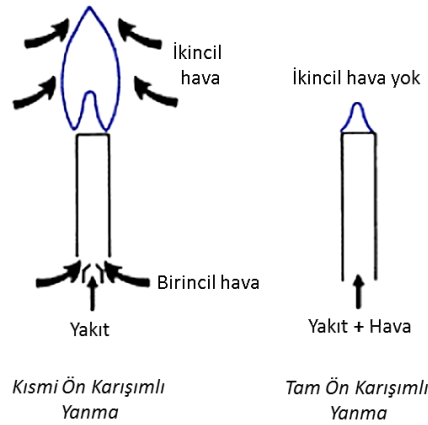
laminer ve türbülanslı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Laminer ön karışimsız yanmaya odun alevi ve mum örnekleri verilebilir. Türbülanslı ön karışimsız yanma ise daha çok endüstriyel fırın ve yakıtlarda görülmektedir.



Şekil 2.6 Ön karışimsız alev (difüzyon alevi)

#### 2.4.2 Ön Karışimli Yanma

Yakıt ve havanın yanmadan önce bir araya gelip karıştıktan sonra atmosfere açılıp tutuşturulmasına ön karışimli yanma denir. Tam ön karışimli yanma ve kısmi ön karışimli yanma olarak iki kısma ayrılmaktadır.



Şekil 2.7 Kısmi ön karışimli yanma ve tam ön karışimli yanma şematik gösterimi

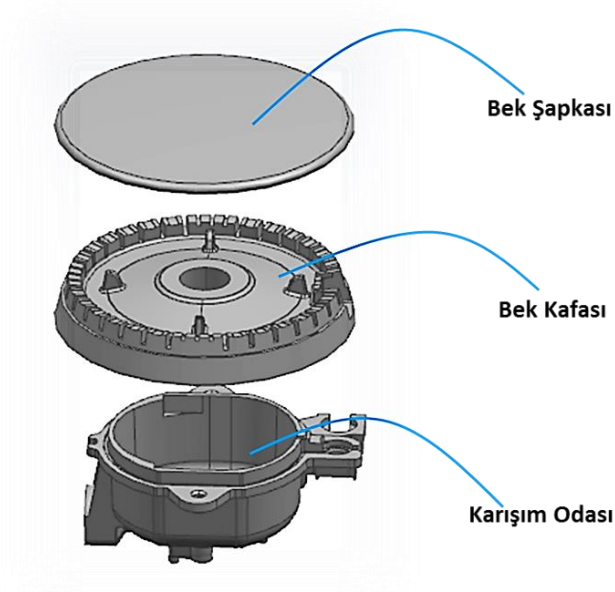
Tam ön karışimli yanmada yakıt stokiyometrik oranda ihtiyacı olan hava ile atmosfere açılmadan karışım odasında karıştırılmaktadır. Tam ön karışimli yakıcı tasarımında bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorluklardan biri gerekli olan havanın sağlanmasıdır. Bunun için genellikle fan gibi ek bir kaynağa ihtiyaç duyulmaktadır. Bir başka zorluk ise

alev kararlılığının sağlanmasıdır. Fazla miktarda birincil hava emişi sonucunda yakıt - hava karışımının yanma hızının yüksek olması yakıcının aşırı ısınmasına ve alevin geri tepmesine sebep olmaktadır. Bu bakımdan tam ön karışimli bir yakıcı tasarlanırken büyük özen gösterilmelidir. Tam ön karışimli yanmanın avantajı ise alevinin küçük ve kompakt olmasıdır. Yerçekiminden en az derecede etkilenecek istenilen yere alev gönderilmektedir. Bu da uygulamalarda yakıcının yerleşimi konusunda büyük esneklik sağlamaktadır.

Kısmi ön karışimli yanmada ise yakıt stokiometrik orandan daha az miktarda hava ile karışım odasında karışmaktadır. Karışım odasından çıkan karışım bir miktar daha hava ile karışarak tutuşturulmaktadır. Ön karışimli yanma ön karışimsız yanmaya göre daha düzgün yakıt - hava karışımı sağladığı için daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Ön karışimli yanma benzinli motorlardan ev tipi yakıcılara kadar geniş bir alanda görülmektedir.

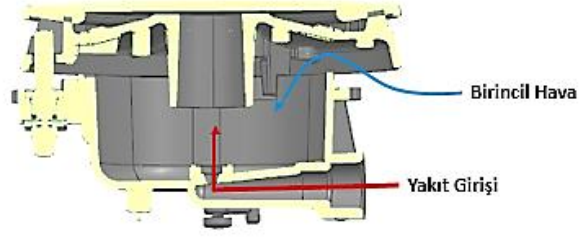
### EV TİPİ YAKICILAR

Ev tipi yakıcılar kısmi ön karışimli yakıcılardır. Bu tip yakıcılarda standartlarda belirtilen yanma sonu emisyonlarını aşmadan yüksek verimlere ulaşarak iyi bir yanma elde edebilmek için hava yakıt karışımı çok önemlidir.



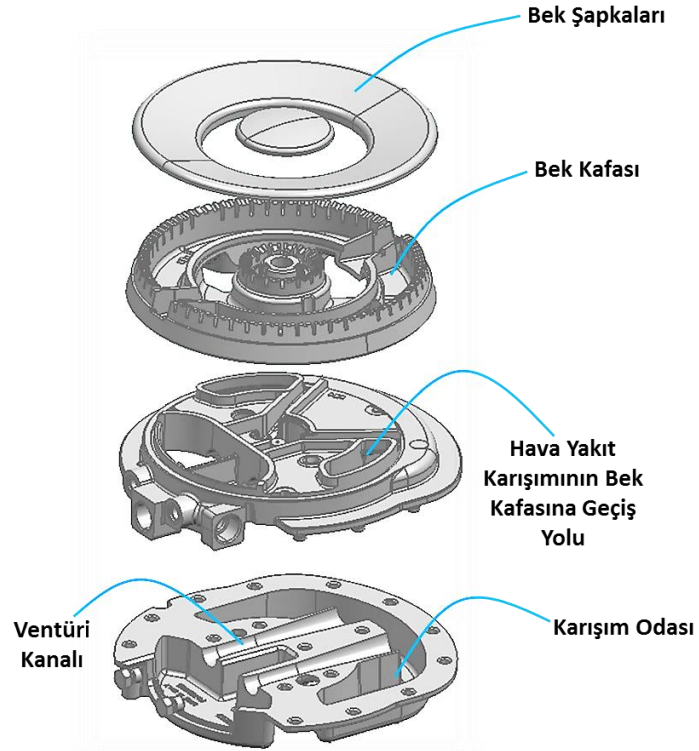
Şekil 3.1 Tek alev halkalı geleneksel ev tipi yakıcı

Şekil 3.1' de tek alev halkasına sahip geleneksel ev tipi bir yakıcı gösterilmektedir. Geleneksel ev tipi yakıcılar karışım odası, bek kafası ve bek şapkası olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Bu yakıcılarda meydana gelen yanma işleminde yakıtın stokiometrik olarak yanması için gerekli olan havadan daha az miktarda hava birincil hava olarak alınmaktadır.



Şekil 3.2 Geleneksel ev tipi yakıcıda yakıt girişi ve birincil hava emişi

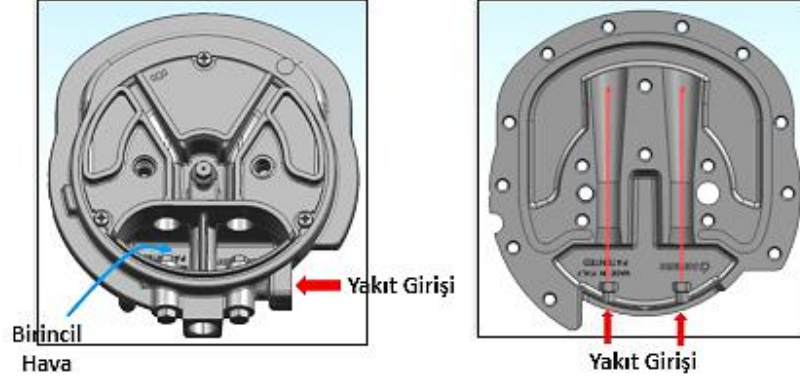
Şekil 3.2' de yakıt ve birincil havanın karışım odasına girişi gösterilmektedir. Karışım odasının tabanında bulunan enjektörden yakıt girişi sağlanmaktadır. Kenarlarda bulunan açıklıklardan da birincil hava çekilerek birincil hava ve yakıt karışmaktadır. Karışım sağlandıktan sonra bek kafasındaki portlardan atmosfere açıldığında bir miktar daha hava ile buluşarak tutuşturulmaktadır.



Şekil 3.3 Birden fazla alev halkasına sahip yüksek güçlü ev tipi yakıcı

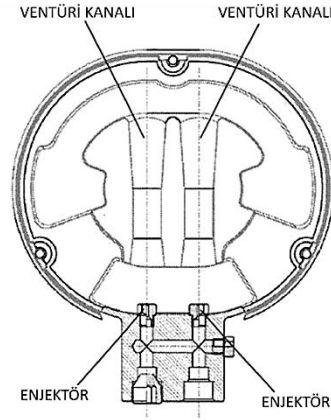
Tek alev halkasına sahip geleneksel ev tipi yakıcılarda ısı girişi (yakıcı gücü) 3 kW' a kadar olmaktadır. Hem pişirme süresini kısaltma ihtiyacından hem de bazı yiyeceklerin yüksek güçte daha iyi pişmesinden dolayı yüksek güçlü yakıcılara ihtiyaç duyulmuştur. Yüksek güçlü bir yakıcı için yakıcıya daha fazla yakıt gönderilmesi gerekmektedir. Daha fazla

yakıt gönderilmesiyle beraber uygun yanmanın gerçekleşebilmesi için daha fazla birincil havaya da ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için karışım odasına bir sistem yapılarak daha fazla birincil hava alımı sağlanmaktadır. Şekil 3.3' de birden fazla alev halkasına sahip yüksek güçlü bir yakıcı gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Yüksek güçlü yakıcıda yakıt girişi ve birincil hava emişi

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5' de gösterilen yakıcı 2 alev halkasına sahip patentli bir yakıcıdır. Dıştaki alev halkasını 2 enjektör, içteki alev halkasını da tek enjektör beslemektedir.



Şekil 3.5 Birden fazla alev halkasına sahip yüksek güçlü yakıcı

Dıştaki alev halkasının beslenmesi sırasında, enjektörden hızla çıkan yakıt jeti etrafında negatif basınç oluşturmaktadır. Yakıt jeti ile ortam havası arasındaki momentum korunumuyla ventüri kanalına birincil hava emişi yakıt jetinin etrafından sürüklenerek sağlanmaktadır. Yakıt ve birincil hava ventüri kanalında ilerledikten sonra karışım odasında karışmaktadır. Karışma işlemi gerçekleştikten sonra da karışım yakıcı kafasından portlara ulaşmakta ve atmosfere açılmaktadır. Yakıcı kafasında bulunan portlar karışımın atmosfere açılmasını sağlayan küçük yuvarlak veya dikdörtgen

biçiminde deliklerdir. Portlardan çıkan karışım burada ikincil hava yani ortam havası ile karşılaşmakta ve tutuşturulmaktadır. [6]

Ev tipi yakıcıların amacı yakıtı kullanılabilir ısıya dönüştürmektir. Bu amaca yönelik kullanılan ev tipi yakıcılarda dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır:

- Yakıtın tam olarak yanması sağlanmalıdır.
- Isıtılacak alanda ısı dağılımı üniform olmalıdır.
- Alev port çıkışlarında kopmamalıdır.
- Yakıtın yakıcıya gönderilme miktarının ayarı (musluk ayarı) alevin geri tepmesine neden olmayacak şekilde yapılmalıdır.
- Ateşleme yapıldığı noktadan itibaren alev portlarda hızlı bir şekilde yayılmalıdır.
- Ateşleme ve yanma durumlarında sessiz olmalıdır.
- Yakıcı konstrüksiyonu uygulama ömrü boyunca ısıtma ve soğutmaya dayanıklı bir yapıda olmalıdır.

Bu hususlar göz önüne alınarak yakıcı tasarımı yapılmalıdır. Yakıtın tam olarak yanması, alevin port çıkışlarında kopmaması ya da geri tepmemesi büyük oranda hava - yakıt karışımı ile ilgili olmaktadır. Bu kapsamda eksik yanmaya neden olmamak ve port çıkışlarında uygun alevin sağlanması için alınan birincil havanın önemi büyüktür. [10]

### **3.1 Enjektörler**

Yakıtın ve dolayısıyla havanın yakıcıya doğru bir şekilde gönderilmesi için enjektör tasarımı önemlidir. Enjektörün boyutu ve şekli, belirli bir yakıt konsantrasyonu ve besleme basıncı için yakıt debisi ve ısı girişiyle bağlantılıdır. Aynı zamanda enjektörün ventüri kanalına doğru konumlandırılması da birincil hava girişini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle enjektör tasarımı ve yakıcıya montajı sırasında hassasiyete önem verilmelidir.

Enjektör, yüksek basınçlı bir gaz kaynağının potansiyel enerjisini gaz jetinin kinetik enerjisine dönüştürmeye yarar. Enjektörde kayıpların olmadığı varsayılarak bu dönüşüm şu şekilde yazılmaktadır.



$$\frac{1}{2}V^2 = gh \quad \rightarrow \quad V = \sqrt{2gh} \quad (3.1)$$

Hızın kesit alanıyla çarpımıyla hacimsel debi bulunur.

$$\dot{V} = A_j \sqrt{2gh} \quad (3.2)$$

Burada  $\dot{V}$  hacimsel debi ( $m^3/s$ ),  $A_j$  enjektör deliğinin kesit alanı ( $m^2$ ),  $g$  yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ ),  $h$  ise enjektördeki gaz basıncını uygulamak için gerekli olan yüksekliği (m) ifade etmektedir. Gösterge basıncı  $P$  (Pa) ise  $h\rho_g g$  ile bulunmakta ve  $\rho_g$  gaz yoğunluğunu ( $kg/m^3$ ) simgelemektedir.

$$\dot{V} = A_j \sqrt{\frac{2P}{\rho_g}} = A_j \sqrt{\frac{2P}{\rho_a \sigma}} \quad (3.3)$$

$\rho_a$  havanın yoğunluğu olarak simgelenmekte ve standart koşullarda  $1,225 kg/m^3$  değerini almaktadır.  $\sigma$  ise gazın bağıl yoğunluğudur.  $\dot{V}$   $m^3/s$ ,  $A_j$   $mm^2$  ve  $P$  mbar alındığı zaman Eşitlik (3.3) aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\dot{V} = 1,278 \times 10^{-5} \times A_j \sqrt{\frac{P}{\sigma}} \quad (3.4)$$

Gazın ısı değeri (CV) ile hacimsel debi çarpıldığında ise ısı girişini vermektedir. ( $q = CV\dot{V}$ ). Isı girişi güç olarak da ifade edilebilmektedir. Wobbe sayısı (W)  $MJ/m^3$  biriminde alınırsa ısı girişi (q) Watt olarak elde edilir.

$$q = 12,78 A_j W \sqrt{P} \quad (3.5)$$

Enjektördeki kayıplar göz önüne alındığında Eşitlik (3.5) şu forma dönüşmektedir.

$$q = 12,78 A_j W C_d \sqrt{P} \quad (3.6)$$

$C_d$  enjektörün boşaltım katsayısıdır ve enjektörden çıkan gerçek debinin teorik debiye oranını ifade etmektedir. Enjektör çıkışındaki gerçek kütleli debinin, aynı akışkan ile

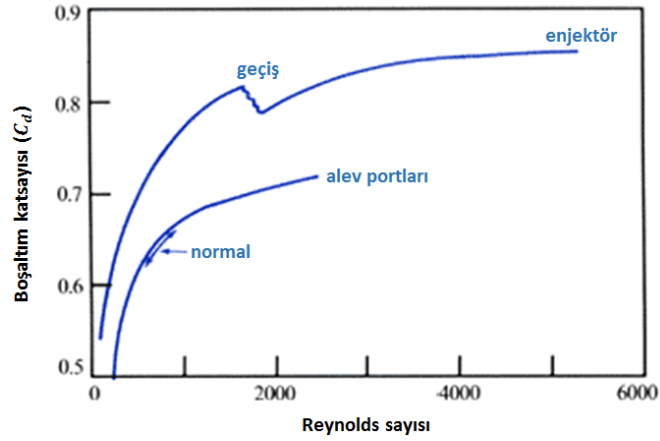
aynı başlangıç koşullarından aynı çıkış basıncına genişlemesini sağlayan ideal enjektörün çıkışındaki kütleli debiye bölümüyle boşaltım katsayısı bulunmaktadır.

$$C_d = Q_{gerçek}/Q_{teorik} \quad (3.7)$$

$$C_d = \dot{m}/\rho\dot{V} \quad (3.8)$$

Burada  $\dot{m}$  akışkanın kütleli debisini,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu ve  $\dot{V}$  akışkanın hacimsel debisini ifade etmektedir.

Boşaltım katsayısı enjektörün şekline ve enjektörden geçen akışkanın Reynolds sayısına bağlıdır. Enjektörün şeklinin etkisine bakılırsa enjektör deliğinin çapına göre delik uzunluğu çok fazlaysa sürtünmeden kaynaklı enerji kaybı artacak ve boşaltım katsayısı da azalacaktır. Eğer enjektör delik uzunluğu çapa göre çok kısaysa bu sefer de enerji kaybının sebebi gazın ani genişlemesi olacaktır.



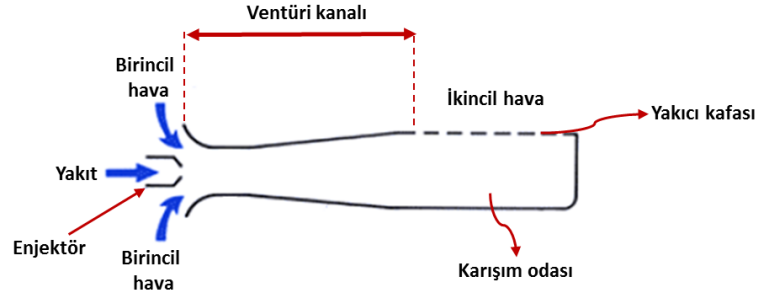
Şekil 3.6 Tipik bir enjektördeki boşaltım katsayısına Reynolds sayısının etkisi

Boşaltım katsayısını etkileyen bir diğer parametre de Reynolds sayısıdır. Şekil 3.6' da gösterildiği gibi tipik bir enjektörde laminar akışta ( $Re < 2000$ ) boşaltım katsayısı ile Reynolds sayısı arasındaki bağlantı son derece önemlidir ve ciddi bir değişim söz konusudur. Türbülanslı akışta ise boşaltım katsayısı neredeyse sabittir.

### 3.2 Birincil Hava Girişi

Yanmanın tam olarak sağlanabilmesi için temel şartlardan biri hava – yakıt karışımıdır. Özellikle ev tipi yakıcılar gibi ön karışimli yanmanın meydana geldiği yakıcılarda sisteme

alınan birincil hava son derece önemli olmaktadır. Alınan birincil havanın miktarı oluşan alevin kararlılığını, şeklini ve sıcaklığını doğrudan etkilemektedir.



Şekil 3.7 Kısmi ön karışimli yakıcı şematik gösterimi

Ön karışimli yanma meydana gelen ev tipi yakıcılarda enjektörden hızla çıkan yakıt jeti, etrafında negatif basınç oluşturmaktadır. Oluşan bu negatif basınç sayesinde yakıt jetinin etrafından çevre havası sürüklenmektedir. Bu şekilde yakıtla ilk kez buluşup sürüklenen bu havaya birincil hava adı verilir. Yakıt jetiyle beraber sürüklenen birincil hava ventüri kanalına girmektedir. Yakıt ve birincil hava karışımının portlardan atmosfere doğru açılabilmesi için akışa karşı oluşacak dirençleri yenmesi gerekir. Bu sebeple statik basınç yüksek olmalıdır. Statik basıncın yükselmesi sadece hızın ve dolayısıyla momentumun düşmesiyle meydana gelmektedir. Karışım hızını düşürme işlemi ventüri tüpü ve karışım odasındaki kademeli genişlemelerle sağlanmaktadır.

Birincil hava girişini teorik olarak hesaplayabilmek için enerji ve momentum dengesi kullanılmıştır. Hava girişi üzerine türetilen eşitliklerde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır. [7]

- Akış ventüri kanalında türbülanslıdır. Bunun yanında hızın, sıcaklığın ve gaz bileşenlerinin radyal yönde bileşenleri bulunmamaktadır.
- Hava ventüri kanalının eksenine dik bir biçimde girmektedir. Bu da aksel momentumun hesaba katılmayacağı anlamına gelmektedir. Bu varsayım geçerlidir. Çünkü, havanın aksel girişi nedeniyle momentumun yükselmesi ventüri kanalındaki sürtünme ve ısı kayıplarının da yükselmesi ile dengelenmektedir.
- Akış sıkıştırılmaz ve bu sayede yoğunluk basınca bağlı değildir.
- Basınç dağılımı yakıcı kafasının her yerinde aynıdır.

- Yanmamış gaz - hava karışımının etkileri ihmal edilmektedir.

Teorik hesaplarda kullanılan fiziksel özellikler  $P$ ,  $A$  ve  $C_d$  sırasıyla basınç, alan ve boşaltım katsayısını simgelemektedir. Alt indis olarak kullanılan  $o$ ,  $j$ ,  $t$  ve  $p$  ise sırasıyla ortam, enjektör çıkışı, ventüri kanalı girişi ve ventüri kanalı çıkışını belirtmektedir. Ayrıca gaz ve hava için  $\rho$  yoğunluk ve  $\dot{V}$  hacimsel debiyi simgelerken alt indis olarak da  $g$ ,  $a$  ve  $m$  sırasıyla gaz, hava ve karışımı belirtmektedir.  $F$  ise kuvveti simgelemektedir.

Ventüri kanalının giriş alanına göre enjektör çıkış alanının çok küçük olması ( $A_i \ll A_t$ ) ve gazın hacimsel debisinin karesinin yanında havanın hacimsel debisinin karesinin ihmal edilebilmesiyle ( $\dot{V}_a^2 \ll \dot{V}_g^2$ ) enjektör çıkışı ile ventüri kanalı girişi arasındaki momentum dengesi aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir.

$$F = P_t A_t - P_o A_t \quad (3.9)$$

$$F = U \rho \dot{V} \quad (3.10)$$

$$P_t A_t - P_o A_t = U_g \rho_g \dot{V}_g - U_m \rho_m \dot{V}_m \quad (3.11)$$

$U = \dot{V}/A$  olduğuna göre  $F = \rho \dot{V}^2/A$  şeklinde yazılabilmektedir. Bu durumda Eşitlik (3.11)'deki momentum dengesi şu şekilde olmaktadır.

$$(P_t - P_o) A_t = \frac{\rho_g \dot{V}_g^2}{A_j} - \frac{\rho_m \dot{V}_m^2}{A_t} \quad (3.12)$$

Ventüri kanalının girişi ve çıkışı arasındaki enerji dengesi de aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$P_p - P_t = \frac{\rho_m \dot{V}_m^2}{2A_t^2} (1 - C_L) \quad (3.13)$$

Burada  $C_L$  ventüri girişi ve çıkışı için sürtünme kayıp katsayısıdır.

Ayrıca enjektörden çıkan gazın ve yakıcı portlarından çıkan hava – yakıt karışımının enerji dengesi Bernoulli denklemini kullanarak sırasıyla şu şekilde bulunmaktadır.

$$P_j - P_o = \frac{\rho_g \dot{V}_g^2}{2A_j^2 C_{dj}^2} \quad (3.14)$$

$$P_p - P_o = \frac{\rho_m \dot{V}_m^2}{2A_p^2 C_{dp}^2} \quad (3.15)$$

Eşitlik (3.12) ve Eşitlik (3.13) birleştirilip  $P_t$  yok edilirse aşağıdaki eşitlik oluşmaktadır.

$$P_p - P_o = \frac{\rho_g \dot{V}_g^2}{A_j A_t} - \frac{\rho_m \dot{V}_m^2}{2A_t^2} (1 + C_L) \quad (3.16)$$

Yakıcı portlarının arkasındaki statik basıncın enjektörden çıkan gaz jetinin dinamik basıncına oranı boyutsuz basınç etkinliği ( $\eta$ ) olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta = \frac{P_p - P_o}{\left( \frac{\rho_g \dot{V}_g^2}{2A_j^2} \right)} \quad (3.17)$$

Eşitlik (3.17) ve Eşitlik (3.14) birleştirildiği durumda boyutsuz basınç etkinliği şu şekilde yazılabilmektedir.

$$\eta = \frac{P_p - P_o}{C_{dj}^2 (P_j - P_o)} \quad (3.18)$$

Ayrıca kolaylık olması için 2 tane matematiksel ifade tanımlanmaktadır.

$$\theta = A_j/A_t \quad ; \quad \lambda = \left( \frac{\rho_m \dot{V}_m^2}{\rho_g \dot{V}_g^2} \right) (1 + C_L)$$

Bu durumda boyutsuz basınç etkinliği aşağıdaki forma dönüşmektedir.

$$\eta = 2\theta - \lambda\theta^2 \quad (3.19)$$

Ön karışımlyanma meydana gelen yakıcılarda performansın yüksek olması için portların arkasındaki statik basıncın yüksek olması gerekmektedir. Bu durumda ideal performansa ulaşılabilmesi için boyutsuz basınç etkinliğinin ( $\eta$ ) de en yüksek değerde olması gerekmektedir. En yüksek boyutsuz basınç etkinliği türev alınıp sonuç sifıra eşitlenerek bulunmaktadır.

$$\frac{d\eta}{d\theta} = 2 - 2\lambda\theta$$

$2 - 2\lambda\theta = 0$  olması için  $\lambda\theta = 1$  olmalıdır. Böylece  $\lambda\theta = 1$  olduğu durumda  $\eta$  en yüksek değerdedir.  $\lambda$  ve  $\theta$  ifadeleri açıldığında aşağıdaki eşitlik ortaya çıkmaktadır.

$$\frac{A_j}{A_t} = \frac{\rho_g \dot{V}_g^2}{\rho_m \dot{V}_m^2 (1 + C_L)} \quad (3.20)$$

Yakıcıya giren birincil havanın enjektörden çıkan gaza hacimsel oranı  $R$  ile gösterilmektedir. Bu durumda  $\dot{V}_a = R\dot{V}_g$  ya da  $\dot{V}_m = \dot{V}_g(1 + R)$  ifadeleri oluşmaktadır. Eşitlik (3.20) tekrar yazılırsa aşağıdaki eşitlik oluşmaktadır.

$$\frac{A_j}{A_t} = \frac{\rho_g}{\rho_m (1 + R)^2 (1 + C_L)} \quad (3.21)$$

Ayrıca karışımın yoğunluğu şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\rho_m = \frac{\rho_g \dot{V}_g + \rho_a \dot{V}_a}{\dot{V}_m} = \frac{\rho_g (\sigma + R)}{\sigma (1 + R)} \quad (3.22)$$

Burada  $\sigma$  gazın bağıl yoğunluğudur. Eşitlik (3.22) ve Eşitlik (3.21) birleştirilirse gaz – hava karışımı ve gaz özelliklerinden enjektör kesit alanının ventüri kanalı girişi alanına oranı bulunabilmektedir.

$$\frac{A_j}{A_t} = \frac{\sigma}{(\sigma + R)(1 + R)(1 + C_L)} \quad (3.23)$$

Eşitlik (3.16) ile Eşitlik (3.22) birleştirilirse ve  $\dot{V}_m = \dot{V}_g(1 + R)$  olarak yazılırsa şu ifade ortaya çıkmaktadır.

$$P_p - P_o = \frac{\rho_g \dot{V}_g^2}{A_t^2} \cdot \left( \frac{A_t}{A_j} - \frac{(\sigma + R)(1 + R)(1 + C_L)}{2\sigma} \right) \quad (3.24)$$

Burada  $A_t/A_j$  yerine Eşitlik (3.23) getirilirse aşağıdaki eşitlik oluşmaktadır.

$$P_p - P_o = \frac{\rho_g \dot{V}_g^2}{A_t^2} \cdot \frac{(\sigma + R)(1 + R)(1 + C_L)}{2\sigma} \quad (3.25)$$

Eşitlik (3.15)' de  $\rho_m$  ve  $\dot{V}_m$  tekrar düzenlenerek Eşitlik (3.26) yazılabilmektedir.

$$P_p - P_o = \frac{\rho_g \dot{V}_g^2}{A_p^2} \cdot \frac{(\sigma + R)(1 + R)}{2\sigma C_{dp}^2} \quad (3.26)$$

Eşitlik (3.25) ve Eşitlik (3.26) birleştirilerek ventüri kanalı giriş alanının port alanına oranı bulunabilmektedir.

$$\frac{A_t}{A_p} = C_{dp} \sqrt{(1 + C_L)} \quad (3.27)$$

Eşitlik (3.27)' den de görüldüğü gibi sistemde hiçbir kayıp olmadığı durumda ( $C_{dp} = 1$ ;  $C_L = 0$ )  $A_t$  ve  $A_p$  eşit olmaktadır.

Enjektör kesit alanının port kesit alanına oranını bulabilmek için Eşitlik (3.23) ile Eşitlik (3.27) birleştirilmektedir.

$$\frac{A_j}{A_t} = \frac{\sigma C_{dp}}{(\sigma + R)(1 + R)\sqrt{1 + C_L}} \quad (3.28)$$

Eşitlik (3.6) ile Eşitlik (3.28) birleştirilerek birim port alanına yüklenen ısı miktarı bulunabilmektedir.

$$\frac{q}{A_p} = \frac{12.78\sigma C_{dp} C_{dj} W \sqrt{P}}{(\sigma + R)(1 + R)\sqrt{1 + C_L}} \quad (3.29)$$

Ön karışımli yakıcılarda yakıt için gerekli olan birincil hava oldukça önemlidir. Gerekli olan birincil havanın yakıcıya gönderilen gaza hacimsel oranını ( $R$ ) bulabilmek için Eşitlik (3.23) düzenlenirse eşitlik şu şekilde olmaktadır.

$$(\sigma + R)(1 + R) = \frac{\sigma}{1 + C_L} \cdot \frac{A_t}{A_j}$$

$$R^2 + R(1 + \sigma) + \sigma \left( 1 - \frac{A_t}{A_j(1 + C_L)} \right) = 0$$

$$R = \frac{-(1 + \sigma) \pm \sqrt{(1 - \sigma)^2 + \frac{4\sigma A_t}{A_j(1 + C_L)}}}{2}$$

$4\sigma A_t/A_j(1 + C_L)$ ' ye göre  $(1 - \sigma)^2$  ifadesi çok küçük olduğundan ihmal edilmektedir. Bu durumda yaklaşık çözüm şu şekildedir.

$$R = \frac{-(1 + \sigma)}{2} + \sqrt{\frac{\sigma A_t}{A_j(1 + C_L)}} \quad (3.30)$$

Eşitlik (3.30) ve Eşitlik (3.27) birleştirilirse birincil havanın gaza oranı Eşitlik (3.31)' e dönüşmektedir.

$$R = \frac{-(1 + \sigma)}{2} + \sqrt{\frac{\sigma A_p C_{dp}}{A_j \sqrt{(1 + C_L)}}} \quad (3.31)$$

### 3.3 Dinamik Denge

Alevin kararlı bir yapıda olması için dinamik dengenin sağlanması gerekmektedir. Portlardan çıkan hava – yakıt karışım hızının yanma hızına eşit olması durumunda dinamik denge sağlanmaktadır. Ayrıca hava ve yakıtın portlardan çıkmadan önce yeterince karışmış olması ve her yerde aynı oranda olması gerekmektedir.

Gaz karışım hızı üzerinde yakıcının etkisi bulunmaktadır. Gaz karışım hızı viskoz etkiler nedeniyle duvarda sıfır değerini almaktadır. Akışın merkezine doğru karışım hızı artmakta ve tam merkezde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Portlardaki alevin laminer akış olması durumunda sınır tabaka kalınlığı da önemli rol oynamaktadır. Laminer akışlarda sınır bölge genelde ince olmaktadır. Metan hava gibi yanmanın yavaş gerçekleştiği bir karışımda bu kalınlık 1 mm civarındadır. [10]

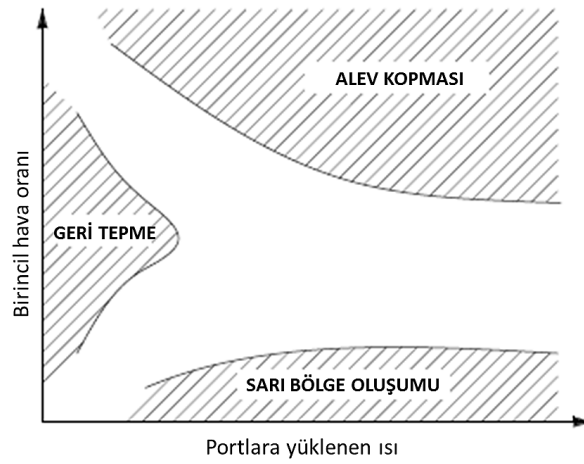
Ev tipi yakıcılarda yanma işleminde alevin ateşlemeden sonra sessiz ve hareketsiz yakın davranması istenmektedir. Böyle bir davranış alevin kararlı olduğunun göstergesidir.



Alev oluşması port çıkışından itibaren belirli bir mesafede gerçekleşmelidir. Alev porta göre belirli bir mesafenin altında oluşmaya başlarsa bu durum alevin geri tepmesi olarak adlandırılmaktadır. Aksine alev belirli bir mesafenin ilerisinde oluşuyorsa bu da alevin kopması anlamına gelmektedir.

Ev tipi bir yakıcıda yanma esnasında istenmeyen 3 durum şöyledir:

1. Alev kopması
2. Alevin geri tepmesi
3. Sarı bölge oluşumu



Şekil 3.8 Birincil hava miktarına bağlı olarak oluşan durumlar

Şekil 3.8' de dikey eksen alınan birincil havanın tam yanma için gerekli olan havaya oranını göstermektedir. Yatay eksen ise portlara yüklenen ısıyı ifade etmektedir. Birim port alanı için gönderilen ısı girişi olarak açıklanabilir. Port çıkış alanı sabit tutulduğunda yakıcının ısı girişi (gücü) ile doğru orantılı olmaktadır. Ev tipi yakıcı tasarımı yapılırken bu üç olaydan herhangi birinin meydana gelmeyecek şekilde bir tasarım yapılmasına dikkat edilmelidir.

### 3.3.1 Alev Kopması

Fazla oranda birincil hava alınması debiyle birlikte akış hızının artmasına neden olmaktadır. Bu durumda akış hızının yanma hızından fazla olması sonucu alev porttan belirli uzaklıkta oluşmakta ve alevde kopmalar meydana gelmektedir. Şekil 3.8' de görüldüğü gibi genellikle alınan birincil hava miktarının fazla olduğu durumlarda alevde

kopmalar görülmektedir. Alınan birincil hava miktarının fazla olmasıyla birlikte karışım hızı belirli bir eşik değerin üzerine çıkarak alev oldukça kararsız bir şekilde ve porttan belirli bir uzaklıkta oluşmakta ve yükselmektedir.

### **3.3.2 Alevin Geri Tepmesi**

Alev oluşumuyla birlikte kararsız davranmaya meyillidir. Alevin kararsız davranmasıyla hem temel problemler ortaya çıkmakta hem de gürültülü yanma söz konusu olmaktadır. Alevin geri tepmesi alevin portlardan daha çıkmadan oluşmaya başlamasıdır. Düşük ısı girişlerinde (güçlerde) yanma hızı karışımın akış hızından fazla ise alevde geri tepmeler meydana gelmektedir. Bu durumda alev portların gerisinde oluşmaya başlamakta ve portlardan geriye doğru yayılma durumu da söz konusu olmaktadır. Yayılmasını sürdürmesi durumunda karışım odasına ulaşması da mümkün olmakta ve patlama riski taşımaktadır.

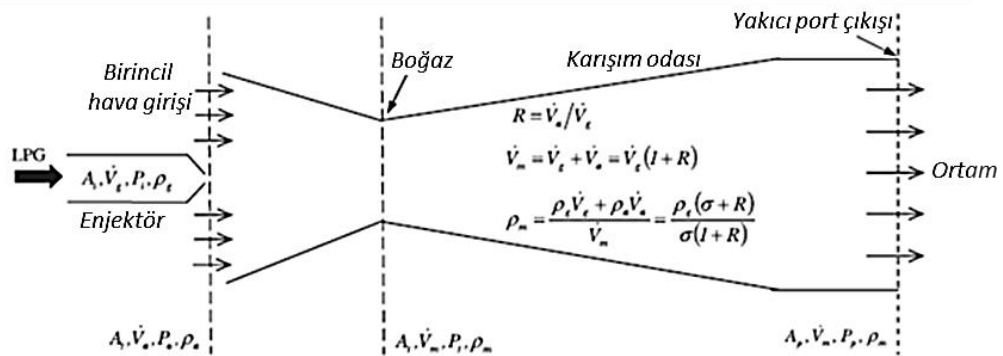
### **3.3.3 Sarı Bölge Oluşumu**

Alınan birincil hava miktarının düşük ve yetersiz olması tam olmayan yanmaya sebep olmakta ve alevde sarı bölgelerin oluşumu görülmektedir. Bu durumda is ve diğer emisyonların oluşumu oldukça fazladır.

Yanma işleminde alev kopması, geri tepmesi ve sarı bölge oluşumu olaylarından herhangi birinin görülmesi son derece sakıncalıdır. Bu olayların meydana gelmesini engellemek için alınan birincil havanın önemi büyüktür. Uygun birincil hava alındığı durumda sağlığa zararlı emisyonların azaldığı ve aynı zamanda yanma veriminin de arttığı görülmektedir. Bu bakımdan yakıcının uygun birincil havayı almasını sağlayacak şekilde yakıcıyı tasarlamak son derece kritiktir. Yapılan araştırmalara göre ev tipi yakıcılarda portlara yüklenen ısı miktarının  $9 \text{ W/m}^2$  ile  $14 \text{ W/m}^2$  arasında olduğu durumlarda %50 – 60 birincil hava alınması gerekmektedir. [7], [10]

## LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

A. Namkhat ve S. Jugjai (2009) [12] yaptıkları çalışmada doğal emişli bir yakıcının birincil hava alışının karakteristiği teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışmalar sıcak ve soğuk testler olmak üzere 2 ana bölümden oluşmaktadır. Alınan birincil havanın ölçümü oksijen sensörü ve PIV (Particle Image Velocimetry) sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen sonuçlara göre birincil hava alışı etkileyen başlıca parametreler yakıt debisi, yakıt tipi, enjektör geometrisi, karışım odasının geometrisi ve yakıcı port geometrisidir. Yapılan deneysel ve teorik çalışmalar birbirini doğrulamıştır. Yakıt debisinin momentumu arttıkça alınan birincil hava miktarı da artmaktadır. Ayrıca birincil hava miktarı, sıcak ortamda yapılan testlerde soğuk ortamda yapılan testlere göre ön ısıtma sebebiyle %37 daha az olmaktadır. Bu yüzden yakıcı tasarımı yapılırken ön ısıtma etkisi ihmal edilmemesi gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 4.1 Doğal emişli yakıcılarda birincil hava girişi

Şekilde de gösterildiği gibi  $A_i$  kesit alanına sahip bir enjektör bulunmaktadır. Kullanılan yakıt LPG olmakta ve basıncı da  $P_i$ ' dir. Enjektörden çıkan LPG karışım odasına girmektedir. Yüksek basınçta bulunan yakıtın potansiyel enerjisi gaz jetinin kinetik enerjisine dönüşmektedir.

Doğal emişli bir yakıcıda birincil hava alış karakteristiği momentum ve enerjinin korunumuna dayanmaktadır. Makalede analitik çözümde yapılan varsayımlar: bir boyutlu, sıkıştırılmaz ve izotermal bir akış olmasıdır.

Sürüklenme oranı  $R$  olarak tanımlanmakta ve  $R = \dot{V}_a/\dot{V}_g$  giren havanın yakıtı oranını ifade etmektedir. Bölüm 3.2' deki teorik hesaplamalar kullanılarak boyutsuz basınç etkinliğinin ( $\eta$ ) maksimum olduğu değerde  $R$  bulunmuştur.

$$R|_{\eta_{max}} = \frac{-(1 + \sigma) \pm \sqrt{(1 - \sigma)^2 + \frac{4\sigma A_t}{A_i(1 + C_L)}}}{2} \quad (4.1)$$

$(1 - \sigma)^2 \ll 4\sigma A_t/A_i(1 + C_L)$  olduğu için  $(1 - \sigma)^2$  ihmal edilmiştir.

$$R|_{\eta_{max}} = \frac{-(1 + \sigma)}{2} + \sqrt{\frac{12,78WCd_i\sqrt{P_i}\sigma A_p Cd_p}{q\sqrt{1 + C_L}}} \quad (4.2)$$

$q = \dot{m}_g LHV$  olduğuna göre enjektörden çıkan yakıtın momentumu şu şekildedir.

$$\dot{M}_g = \dot{m}_g u_g = \frac{12,78A_i u_g WCd_i\sqrt{P_i}}{LHV} \quad (4.3)$$

Bu durumda  $R$  şu şekilde yazılmıştır.

$$R|_{\eta_{max}} = \frac{-(1 + \sigma)}{2} + \sqrt{\frac{\dot{M}_g LHV \sigma A_p Cd_p}{A_i u_g q \sqrt{1 + C_L}}} \quad (4.4)$$

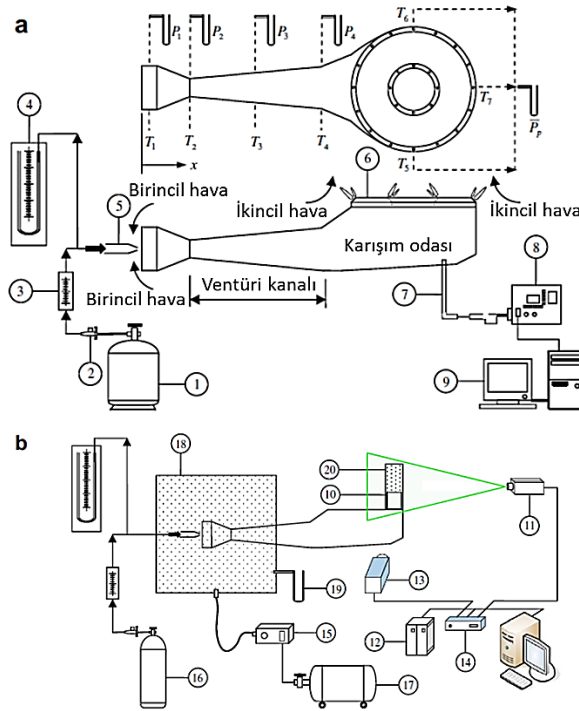
Eşitlik (4.4)' e göre hava giriş oranının ( $R$ ) birer fonksiyonu olarak yakıtın momentumu ( $\dot{M}_g$ ), yakıtın tipi ( $LHV$  (alt ısı değer) ve  $\sigma$  (bağıl yoğunluk)), yakıcı port geometrisi ( $A_p$ ), enjektör geometrisi ( $A_i$ ) ve ventüri geometrisi ( $A_t$ ) belirlenmiştir.

Yakıtın tipi belirtildiğinde ve  $A_p$  ile  $A_i$  sabit olarak alındığında hava giriş oranını  $R$  etkileyen ana parametre  $\dot{M}_g$  olmaktadır. Eşitlikten de görüldüğü gibi yakıtın momentumu  $\dot{M}_g$  arttıkça hava giriş oranı  $R$  da artmaktadır.

Yakıcılar için alınan birincil havanın oranı şu şekilde gösterilmektedir.

$$PA_c = \frac{R}{(A/F)_{stoi}} \times 100 \quad (4.5)$$

Yapılan çalışmada yakıcılar için birincil hava girişinin ölçümü sıcak ve soğuk olmak üzere iki farklı durum için yapılmaktadır. Sıcak olarak adlandırılan durum için giren birincil havanın ölçümü oksijen sensörü ile, soğuk olan durum için ise hem oksijen sensörü hem de PIV (Particle Image Velocimetry) sistemi kullanılarak yapılmaktadır. Bu durum şematik olarak Şekil 4.2 (a) oksijen sensörü ve (b) PIV yöntemiyle gösterilmektedir.



- |                      |                       |                                       |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 1. Yakıt             | 8. Oksijen sensörü    | 15. Atomizer                          |
| 2. Basınç regülatörü | 9. Bilgisayar         | 16. Karbon dioksit (CO <sub>2</sub> ) |
| 3. Debimetre         | 10. Tek portlu yakıcı | 17. Hava kompresörü                   |
| 4. Civalı manometre  | 11. Nd:YAG lazer      | 18. Kapalı kutu                       |
| 5. Enjektör          | 12. Güç kaynağı       | 19. Su manometresi                    |
| 6. Çok portlu yakıcı | 13. Kamera            | 20. Akrilik kalkan                    |
| 7. Sensör tüpü       | 14. Senkronizer       |                                       |

Şekil 4.2 Deney düzeneklerinin şematik gösterimi

Şekil 4.2 (a)' da şematik diyagramı gösterilen birincil hava girişinin ölçümü hem sıcak hem de soğuk deneylerde oksijen sensörü kullanılarak yapılmıştır. Deneyleri yapılan yakıcının enjektör deliğinin kesit alanı  $A_i = 0,64 \text{ mm}^2$ , ventüri boğazının kesit alanı  $A_t = 254,47 \text{ mm}^2$  ve yakıcının tüm portlarının kesit alanı toplamı  $A_p = 245,44 \text{ mm}^2$ ' dir. Deneylerde yakıt olarak LPG kullanılmıştır. Yaklaşık %0,05 doğruluk oranıyla oksijen miktarı ölçümü yapılmıştır. Gösterilen birincil hava değerlerinin en yüksek ve en düşük belirsizlikleri sırasıyla %4,7 ve %2,2 olmaktadır.

Yapılan sıcak deneylerde LPG' nin debisi basınç regülatörü (2) ile kontrol edilmektedir ve geçen debi debimetreden (3) görülmektedir. Yakıtın hacimsel debisi ölçülmekte ve akışın hızı ( $u_g$ ), kütleli debisi ( $\dot{m}_g$ ) ve yakıtın momentumu ( $\dot{M}_g$ ) hesaplanabilmektedir. Civalı monometre (4) yakıtın basıncını göstermektedir.

Enjektör deliğinden yakıt hızla çıkmaktadır. Çıkan bu yakıt jetiyle ortam havası arasındaki momentum dengesi sayesinde yakıt birincil havayı alarak sürüklemektedir. Daha sonrada yakıt/hava karışımı ventüri tüpüne girmekte ve karışarak yakıcının portlarına (6) düzgün bir şekilde dağılmaktadır. Bu şekilde ön karışimli alev oluşmaktadır. (Sıcak deney) Bu durumda alınan birincil hava aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilmektedir.

$$PA_{c,h} = \frac{\%O_2}{(A/F)_{stoi} \times (21 - \%O_2)} \times 100 \quad (4.6)$$

Soğuk deneylerin sıcak deneylerden tek farkı, soğuk deneylerde yanma işlemi gerçekleşmemektedir. Soğuk deneylerde yakıcı portlarından çıkan gaz yanmadan ortama dağıldığı için patlama riski bulunmaktadır. Yapılan soğuk deneylerde patlama riskinden kaçınmak için ortam iyi bir şekilde havalandırılmıştır.

Şekil 4.2 (a)' da gösterildiği gibi ventüri tüpünün çeşitli noktalarından basınç  $P$  ve sıcaklık  $T$  ölçümleri yapılmıştır. Ventüri tüpünden port çıkışına kadar 7 farklı noktadan,  $T_1 - T_7$ , K tipi termokupllar ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Yakıcı halkasındaki üç termokupldan alınan sıcaklık ölçümlerinin ( $T_5, T_6$  ve  $T_7$ ) ortalaması alınarak portlara yakın karışım sıcaklığı ( $\bar{T}_p$ ) belirlenmiştir. Ventüri tüpündeki statik basınçlar ( $P_1 - P_4$ ) su monometresi kullanılarak ölçülmüştür. Yakıcı port sıcaklığının ( $\bar{T}_p$ ) hesabında olduğu gibi aynı noktalardan ölçümler alınarak portun statik basıncı ( $\bar{P}_p$ ) belirlenmiştir.

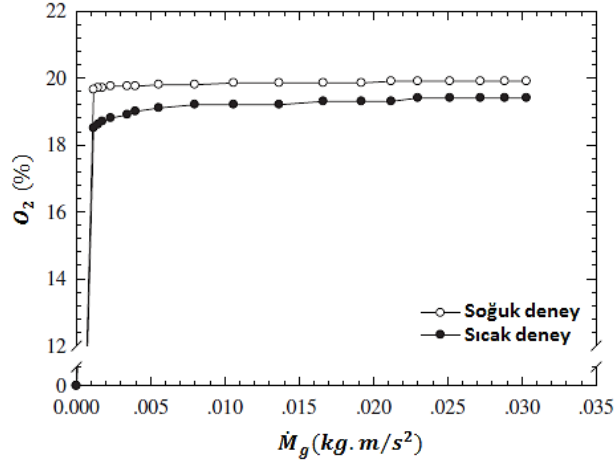
Şekil 4.2 (b)' de gösterilen şematik diyagramda ise birincil havanın ölçümü PIV tekniği kullanılarak yapılmıştır. PIV tekniği kullanılarak oksijen sensöründe ölçülen değerlerin doğrulanması sadece soğuk deneylerde uygulanabilmektedir. Şematik diyagramda gösterilen tek porta sahip yakıcının (10) portunun kesit alanı diğer diyagramda gösterilen birden fazla porta sahip yakıcının (6) portlarının kesit alanları toplamına eşittir. Tek porta sahip yakıcının birincil hava ölçümünde PIV tekniği kullanılmaktadır ve birden fazla porta sahip yakıcıyla aynı enjektöre ve ventüri kanalına sahiptir. Soğuk deneylerde güvenlik sebebiyle LPG yerine karbon dioksit ( $CO_2$ ) kullanılmıştır. PIV sisteminde 532 nm dalga boyunda lazer kullanılmıştır. Lazerin darbe enerjisi yaklaşık 120 mJ/pulse, bir darbe süresi 5 ns ve bir tekrar oranı 15 Hz' dir. Ayrıca 28 mm lense sahip 2 megapixel F/2.8 Nikon kamera ile parçacıkların hareketleri kaydedilmiştir. Atomizer kullanılarak birincil hava akışına 6  $\mu$ m boyutunda yağ parçacıkları eklenmiştir.

$CO_2$ ' nin hacimsel debisi ( $\dot{V}_{CO_2}$ ) regülatör ile kontrol edilmekte ve debimetre ile de okunmaktadır. Enjektör deliğinden ventüri tüpüne doğru  $CO_2$  püskürtülmektedir. Aynı zamanda yağ parçacıkları ve birincil hava, hava kompresörü (17) ile kapalı kutuya (18) gönderilmektedir. Püskürtülen gaz ile çevre havası arasındaki momentum dengesi sayesinde birincil hava ve yağ parçacıkları ventüri tüpüne girmektedir. Karışım tek portlu yakıcının portundan yayılmaktadır. Port çıkışı akrilik kalkan (20) ile kaplıdır. Bu sayede ikincil hava girişi önlenmektedir. Portlardan karışımın çıkış hızı PIV ile belirlenmektedir. Böylece karışımın hacimsel debisi hesaplanabilmektedir.

$$R = \frac{\dot{V}_a}{\dot{V}_{CO_2}} = \frac{\dot{V}_m - \dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{CO_2}} \quad (4.7)$$

$$PA_C = \frac{R}{(A/F)_{stoi.}} \times 100 \quad (4.8)$$

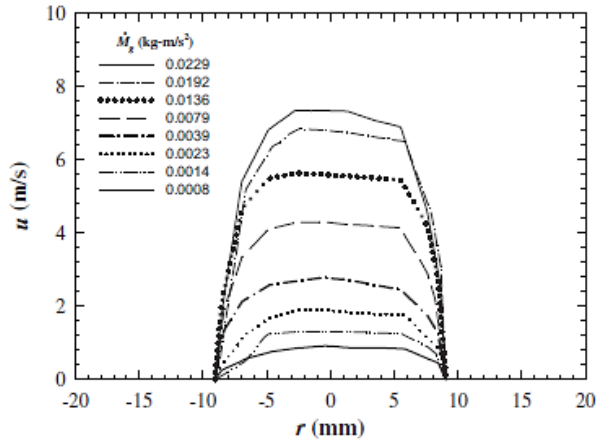
Doğal emişli bir yakıcıya uygulanan sıcak ve soğuk deneyler için tipik oksijen oranları Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Sıcak ve soğuk deneylerde ölçülen oksijen oranları

Şekilde de görüldüğü gibi başlangıçta yakıtın momentum oranı ( $\dot{M}_g$ ) arttıkça oksijen oranı da hızla yükselmektedir. Daha sonra ise momentum oranına bağlı olmadan kararlı bir hale gelmektedir. Ayrıca oksijen oranı sıcak durumdaki deneylerde soğuk durumdaki deneylere göre yaklaşık 2-3 puan (10-15%) daha düşük çıkmaktadır. Bunun nedeni sıcak deneylerde karışımın genişlemesi ve viskozitesinin artmasıdır.

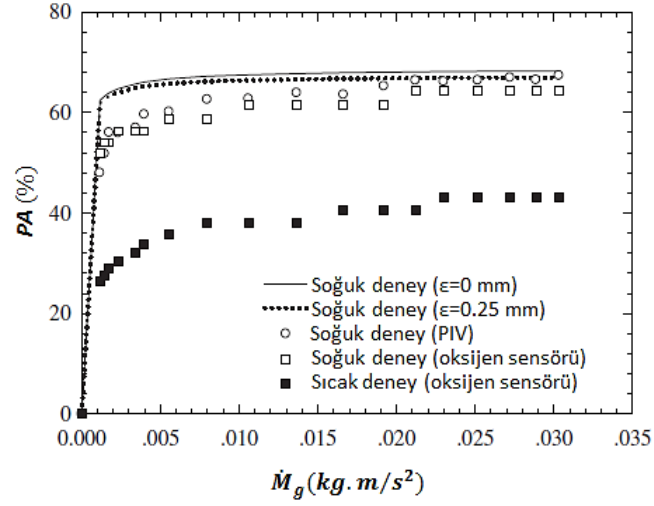
Şekil 4.4' de tek porta sahip yakıcının port çıkışındaki hız profilleri gösterilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi  $\dot{M}_g$  düştükçe hız da düşmektedir.



Şekil 4.4 Tek porta sahip yakıcının port çıkışındaki hız profilleri

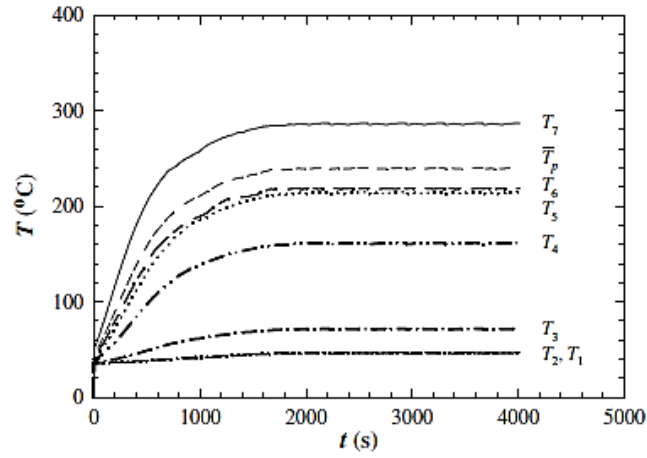
Şekil 4.5' de alınan birincil havanın soğuk durum için teorik sonuçları ile soğuk ve sıcak durumlar için ölçüm sonuçları karşılaştırılmaktadır. Başlangıç durumlarında teorik ve deneysel olarak  $\dot{M}_g$  arttıkça birincil hava (PA) seviyesi de hızla artmaktadır.





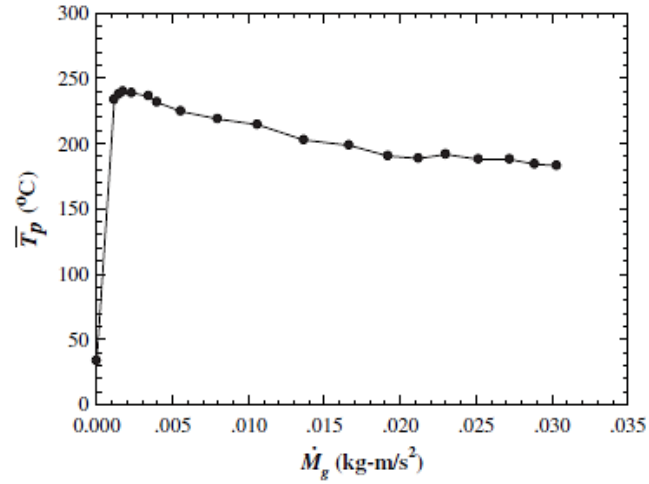
Şekil 4.5 Teorik ve deneysel birincil hava oranlarının karşılaştırılması

Ventüri tüpünün yüzey pürüzlülüğü  $\epsilon = 0$  olduğu durumda teorik olarak hesaplanan birincil hava, PIV de ölçümü alınıp hesaplanan birincil havaya göre daha yüksektir. Eğer yüzey pürüzlülüğü  $\epsilon = 0.25$  alınırsa teorik sonuçlar PIV sonuçları ile daha tutarlı olmaktadır. Ayrıca sıcak deneylerde alınan birincil hava soğuk deneylerde alınan birincil havaya göre ön ısıtma etkisi sebebiyle yaklaşık 22 puan (yaklaşık %37) daha düşüktür.



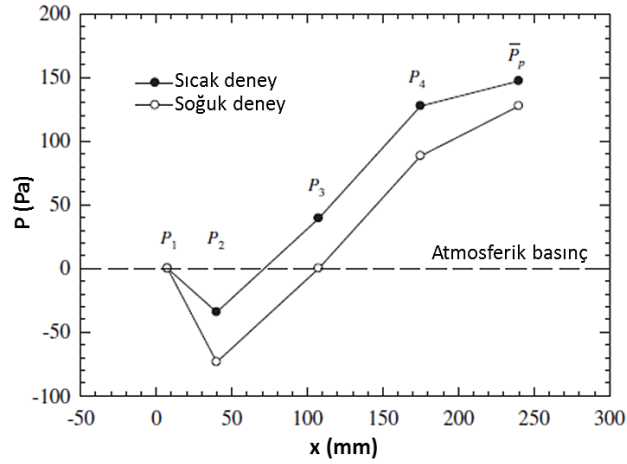
Şekil 4.6  $\dot{M}_g = 0.0017 kg.m/s^2$  için karışım sıcaklıkları [12]

Şekil 4.6' da sıcak deneyde  $\dot{M}_g = 0.0017 kg.m/s^2$  için karışım sıcaklıklarının zamana bağlı değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Portların çıkışlarına yakın ortalama karışım sıcaklığı

Portların çıkışlarına yakın ortalama karışım sıcaklığının ( $\bar{T}_p$ ),  $\dot{M}_g$ ' ye göre değişimi Şekil 4.7' de gösterilmektedir.  $\dot{M}_g$ ' nin artmasıyla  $\bar{T}_p$  azalmaktadır. Bunun sebebi ise  $\dot{M}_g$  arttıkça karışımın hızının da artması ve böylece soğutma etkisi göstermesidir.



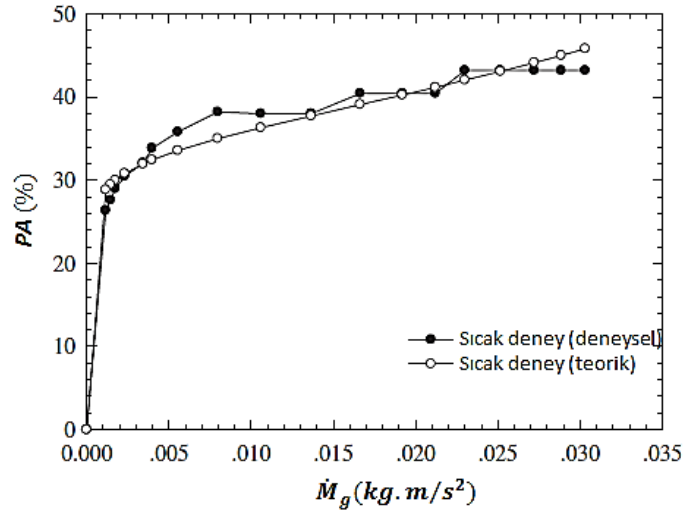
Şekil 4.8  $\dot{M}_g = 0.0303 \text{ kg.m/s}^2$  için basınç düşümleri

Sıcak ve soğuk testler için ventüri tüpündeki statik basınç değişimleri Şekil 4.8' de gösterilmektedir. Ventüri tüpünün girişindeki basınç  $P_1$  sıfırdır ve atmosferik basıncı ifade etmektedir. Ventüri boğazında basınç  $P_2$  düşmekte ve negatif olmaktadır. Bu sayede vakum etkisi yaparak birincil hava girişini sağlamaktadır. Ventüri boğazının ilerisinden port çıkışına kadar basınç yavaşça yükselmektedir. Ayrıca genel olarak sıcak deneylerdeki basınç dağılımı soğuk deneylerde olan basınç dağılımına göre daha yüksektir. Bu da ventüri tüpündeki karışım akışının genişlemesiyle açıklanmaktadır.

Yapılan çalışmada sıcak deneylerdeki birincil hava  $PA_h$  soğuk deneylerdeki birincil havadan  $PA_c$  tahmini olarak hesaplanabilmektedir.  $PA_h$  hesaplanırken yanmanın sebep olduğu port çıkışlarındaki karışımın sıcaklığının yükselmesinin etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. Sıcaklığın yükselmesi özellikle karışımın viskozitesini etkilemektedir.  $PA_h$ ' nin fonksiyonu olarak  $PA_c$  ve sıcaklığında dahil edilmesiyle en uygun bağıntı aşağıdaki gibi olmaktadır.

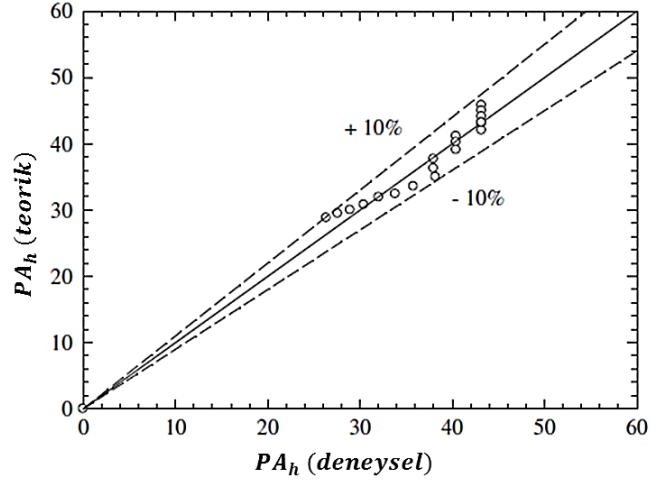
$$PA_h = PA_c \left( \frac{v_h}{v_c} \right)^{-0.09 \exp[v_h/v_c]} \quad (4.9)$$

Burada  $v_h$  ve  $v_c$  sırasıyla portların çıkışında ortalama sıcaklıktaki  $\bar{T}_p$  ve ventüri tüpüne giriş sıcaklığındaki  $T_1$  havanın kinematik viskoziteleridir. Bu eşitlik  $30 < \bar{T}_p < 300^\circ\text{C}$  için kullanılmaktadır. Bu eşitlik kullanılarak hesaplanan  $PA_h$  ve deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 4.9' da gösterilmektedir.



Şekil 4.9 Birincil hava oranının teorik ve deneysel karşılaştırılması

Şekil 4.10' da ise Eşitlik (4.7) kullanılarak elde edilen sonuç ile deneysel olarak elde edilen  $PA_h$  değerleri grafik olarak karşılaştırılmaktadır. Ventüri tüpünün yüzey pürüzlülüğü  $\epsilon = 0.25$  mm alınmıştır. Deneysel ve teorik sonuçlarda en fazla sapma  $\pm 10\%$  olarak belirlenmiştir.



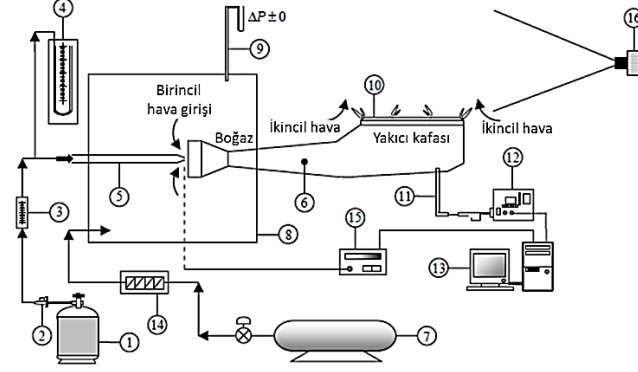
Şekil 4.10 Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması

Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar özetle şu şekildedir:

- Birincil hava girişini ( $PA_c$ ) etkileyen temel parametreler yakıtın momentum oranı ( $\dot{M}_g$ ), yakıtın tipi, enjektör geometrisi, ventüri tüpü geometrisi ve yakıcı port geometrisidir.
- $\dot{M}_g$ ' nin artmasıyla  $PA$  seviyesi başlangıçta hızla yükselmektedir. Daha sonra ventüri tüpü ile port boyutlarının limitleri nedeniyle kararlı bir hale ulaşmakta ve  $\dot{M}_g$ ' den bağımsız hale gelmektedir.
- Soğuk olarak yapılan deneylerde oksijen sensörü ve PIV tekniği ile belirlenen  $PA$  miktarı neredeyse aynıdır. Yanma neticesinde ön ısıtma etkisinden dolayı sıcak deneydeki  $PA$  miktarı, soğuk deneydeki  $PA$  miktarından yaklaşık 22 puan (%37) düşük çıkmıştır.
- $PA_h$  hesabı için kullanılan teorik formül bu çalışmada deneysel olarak da doğrulanmıştır. Deneysel ve teorik sonuçlar arasında en fazla sapma  $\pm 10\%$  olarak belirlenmiştir.

A. Namkhat ve S. Jugjai (2011) [13] tarafından doğal emişli bir yakıcıda toplam hava sürüklenmesinin tahmini teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Ön ısıtmanın olduğu ve olmadığı iki durum üstüne durulmuştur. Ayrıca karışımın oksijen konsantrasyonu oksijen sensörü ile ölçülmüştür. Böylece karışımın içindeki birincil hava miktarı belirlenmiştir. Toplam eşdeğerlik oranının tahmini için yapılan sayısal hesaplamalarda momentum ve enerjinin korunumu ilkesi kullanılmıştır. Isı girişi arttıkça yüksek

momentum etkisi sebebiyle birincil ve ikincil havanın miktarlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ön ısıtmalı durumda daha az birincil ve ikincil hava sürüklendiği görülmüştür. Bunun nedeni olarak sıcaklığın artmasıyla karışım odasındaki akışkanın viskozitesinin artması olduğu düşünülmektedir.



- |                      |                    |                       |                    |
|----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| 1. Yakıt             | 5. Enjektör        | 9. Su manometresi     | 13. Bilgisayar     |
| 2. Basınç regülatörü | 6. Ventüri kanalı  | 10. Çok portlu yakıcı | 14. Hava ısıtıcı   |
| 3. Debimetre         | 7. Hava kompresörü | 11. Numune alma tüpü  | 15. Veri kaydedici |
| 4. Civalı manometre  | 8. Hava deposu     | 12. Oksijen sensörü   | 16. Dijital kamera |

Şekil 4.11 Deneysel düzenek şeması

Şekil 4.11’ de şematik diyagramı gösterilen birincil hava girişinin ölçümü hem sıcak hem de soğuk deneylerde oksijen sensörü kullanılarak yapılmıştır. Deneyleri yapılan yakıcının enjektör deliğinin kesit alanı  $A_i = 0,64 \text{ mm}^2$ , ventüri boğazının kesit alanı  $A_t = 254,47 \text{ mm}^2$  ve yakıcının tüm portlarının kesit alanı toplamı  $A_p = 245,44 \text{ mm}^2$  dir. Deneylerde yakıt olarak LPG kullanılmıştır. Yaklaşık %0,05 doğruluk oranıyla oksijen miktarı ölçümü yapılmıştır.

Yapılan deneylerde LPG’ nin debisi basınç regülatörü (2) ile kontrol edilmektedir. Yakıtın ısı girişini hesaplayabilmek amacıyla hacimsel debi de ölçülmektedir. Hava kompresöründen (7) gönderilen hava, hava deposuna (8) dolmakta ve birincil hava olarak kullanılmaktadır.

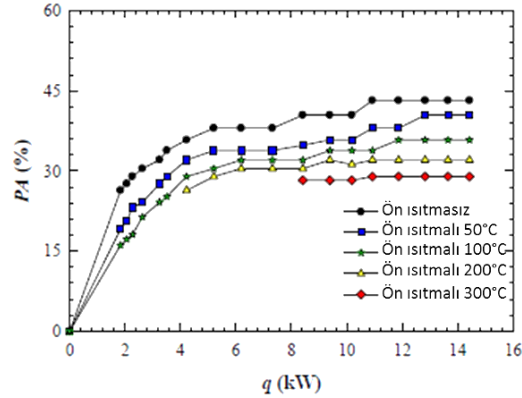
Ayrıca deponun basıncının atmosfer basıncında kalması sağlanmaktadır. Hava deposunun etrafı 4 cm kalınlığında seramik fiber ile kaplı haldedir.

Deneyde oksijen konsantrasyonu numune alma tüpü (11) kullanılarak ölçülmektedir. Oksijen sensörü (12) ile belirlenen değerler bilgisayardan (13) görülmektedir. Okunan değerlere göre alınan birincil hava (4.10)’ daki eşitlikle hesaplanabilmektedir.

$$PA = \frac{\%O_2}{(A/F)_{stoi}x(21 - \%O_2)} x100 \quad (4.10)$$

Ön ısıtmalı durumda ise ön ısıtma olmadığı durumdaki gibi aynı işlemler uygulanarak deney yapılmaktadır. Bu deneylerde tek fark birincil havanın ısıtılmasıdır. Hava ısıtıcı (14) sayesinde birincil havanın sıcaklığı kontrol edilmektedir. Bu çalışmada dört farklı ön ısıtılmış hava kullanılmıştır. Deneylerdeki ön ısıtılmış hava sıcaklıkları ( $T_{pre}$ ) 50°C, 100°C, 200°C ve 300°C' dir. Ayrıca alev yüksekliklerini ölçmek için dijital kamera (16) ile alev görüntüleri de çekilmiştir.

Şekil 4.12' de ön ısıtma olduğu ve olmadığı durumlardaki sürüklenen birincil hava oranları görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi sürüklenen birincil hava oranı ısı girişinin ( $q$ ) artmasıyla başlangıçta hızlı bir şekilde artmaktadır. Daha sonradan rejime oturup sabit bir değer almakta ve ısı girişinden bağımsız olmaktadır. Bunun sebebi olarak düşünülen durum ventüri kanalı ve port boyutlarının alınan birincil havayı sınırlandırmasıdır.



Şekil 4.12 Sürüklenen birincil hava oranları

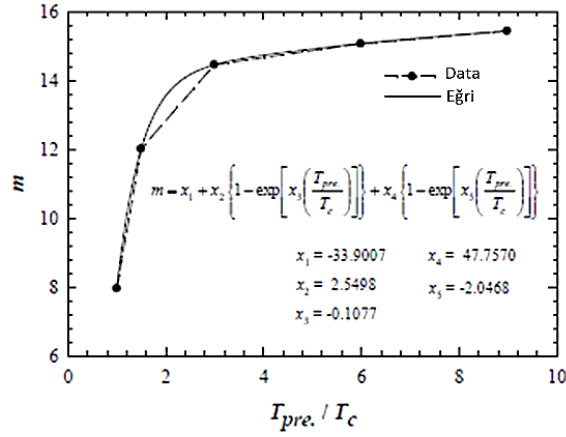
Şekil 4.12' den de görüldüğü gibi ön ısıtma sıcaklığı yükseldikçe sürüklenen birincil hava azalmaktadır. 300°C ön ısıtma sıcaklığında yapılan deneyde ön ısıtmasız deneye göre sürüklenen birincil hava 14 puan (%33) düşük çıkmıştır. Bunun sebebinin sıcaklığın yükselmesiyle karışımın genişlemesi ve viskozitenin artışı olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca bu çalışmada ön ısıtılmış birincil hava sıcaklığının fonksiyonu olarak sürüklenen birincil hava miktarını belirleyen deneysel bağıntılar çıkarılmıştır. Soğuk deneylerde sürüklenen birincil havadan ( $PA_c$ ) sıcak deneylerde sürüklenen birincil hava ( $PA_h$ )

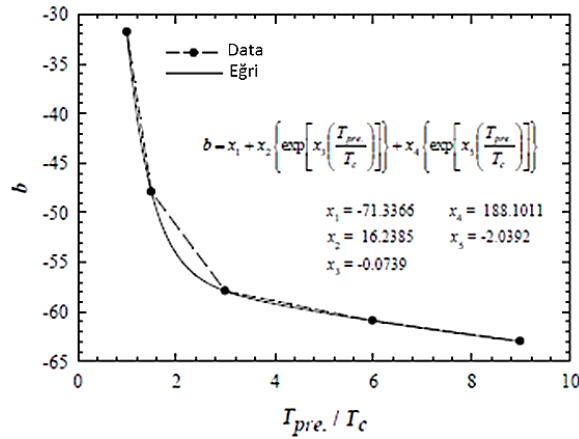
tahmin edilmektedir. Bu tahmin yapılırken ventüri kanalına giren birincil havanın ön ısıtma nedeniyle sıcaklığının yükselme etkisi de hesaba katılmaktadır.  $PA_c$  ve sıcaklığın fonksiyonu olarak  $PA_h$  için en iyi deneysel bağıntı belirlenmiştir. Bu bağıntı aşağıdaki şekildedir.

$$PA_h = PA_c \left[ \frac{T_f}{T_c} \right]^m e^{\lambda b} \quad (4.11)$$

Burada  $T_f$  ve  $T_c$  sırasıyla adyabatik alev sıcaklığı ve ortam sıcaklığıdır.  $\lambda$  tamamlanma aşamasıdır. Yanma olmadığı durumda  $\lambda = 0$ ' dir. Yanma gerçekleştiği durumda ise  $\lambda = 1$ ' dir. Ayrıca Eşitlik (4.9)' daki m ve b değerleri değişken terimler olup sırasıyla eğim ve kesimi ifade etmektedir. Bu değişken terimler ön ısıtılmış birincil hava sıcaklığına bağlıdır. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14' de sırasıyla m ve b terimlerinin  $(T_{pre}/T_c)$  ifadesine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 4.13  $(T_{pre}/T_c)$ ' ye göre m' in değişimi



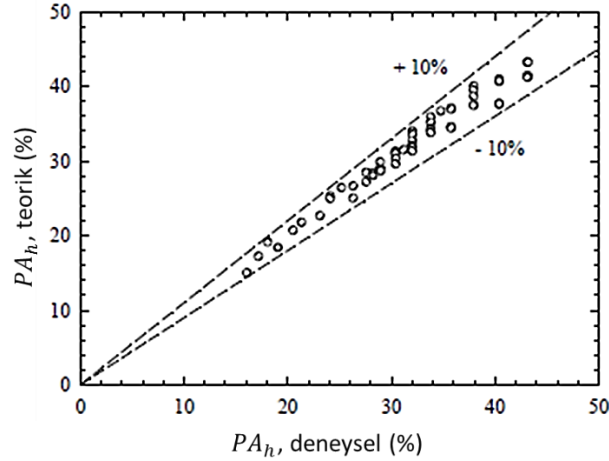
Şekil 4.14  $(T_{pre}/T_c)$ ' ye göre b' nin değişimi

Şekilde gösterilen eşitlikler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$m = -33,9007 + 2,5498 \left[ 1 - e^{\left\{ -0,1077 \left( \frac{T_{pre}}{T_c} \right) \right\}} \right] + 44,7570 \left[ 1 - e^{\left\{ -2,0468 \left( \frac{T_{pre}}{T_c} \right) \right\}} \right]$$

$$b = -71,3366 + 16,2385 \left[ e^{\left\{ -0,0739 \left( \frac{T_{pre}}{T_c} \right) \right\}} \right] + 188,1011 \left[ e^{\left\{ -2,392 \left( \frac{T_{pre}}{T_c} \right) \right\}} \right]$$

Bu eşitliklerde  $T_{pre}$  ön ısıtılmış birincil hava sıcaklığını ifade etmektedir ve bu eşitlikler  $30^\circ C < T_{pre} < 300^\circ C$  arasında geçerli olmaktadır. Eşitlik (4.11) deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında en iyi değerleri vermektedir. Şekil 4.15' de ventüri kanalının yüzey pürüzlülüğü  $\epsilon=0,25$  mm alındığında  $PA_h$  değerinin deneysel ve teorik karşılaştırma sonucu gösterilmiştir. Sonuçlara göre maksimum sapmanın  $\pm 10\%$  olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15  $PA_h$  değerinin deneysel ve teorik olarak karşılaştırılması

Ricou ve Spalding (1961) [14] tarafından yapılan çalışmada türbülanslı jet akışında ikincil havanın belirlenmesi için deneysel bir teknik sunulmaktadır. Bunun sonucunda sürüklenen ikincil havanın bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\dot{m}_m + \dot{m}_{sa}}{\dot{m}_m} = 0,32 \left( \frac{\rho_{sa}}{\rho_m} \right)^{0,5} \frac{h_f}{D_p} \quad (4.12)$$

Bu eşitlikte  $\dot{m}_{sa}$  ikincil havanın kütleli debisini,  $\dot{m}_m$  karışımın kütleli debisini,  $\rho_{sa}$  ikincil havanın yoğunluğunu,  $\rho_m$  karışımın yoğunluğunu,  $h_f$  alev yüksekliğini ve  $D_p$  port çapını ifade etmektedir.



Eşitlik (4.12) ile  $\dot{V}_{sa} = \dot{m}_{sa}/\rho_{sa}$  birleştirildiğinde ikincil havanın hacimsel debisi şu şekilde yazılabilmektedir.

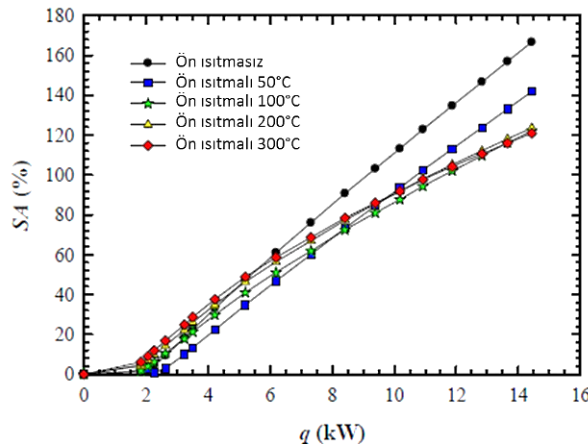
$$\dot{V}_{sa} = \frac{\dot{m}_m}{\rho_{sa}} \left[ \left( 0,32 \left( \frac{\rho_{sa}}{\rho_m} \right)^{0,5} \frac{h_f}{D_p} \right) - 1 \right] \quad (4.13)$$

Ayrıca sürüklenen ikincil hava şu şekilde ifade edilmektedir.

$$SA = \frac{\dot{V}_{sa}/\dot{V}_g}{(A/F)_{stoi}} \times 100 \quad (4.14)$$

Bu eşitlikte  $\dot{V}_g$  yakıtın hacimsel debisi,  $(A/F)_{stoi}$  ise stokiometrik hava-yakıt oranıdır.

Şekil 4.16' da doğal emişli bir yakıcı için Eşitlik (4.14)' i kullanarak belirlenen ikincil hava oranları gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi ön ısıtma olduğu ve olmadığı durumda ikincil hava miktarı ısı girişinin ( $q$ ) artmasıyla artmaktadır.



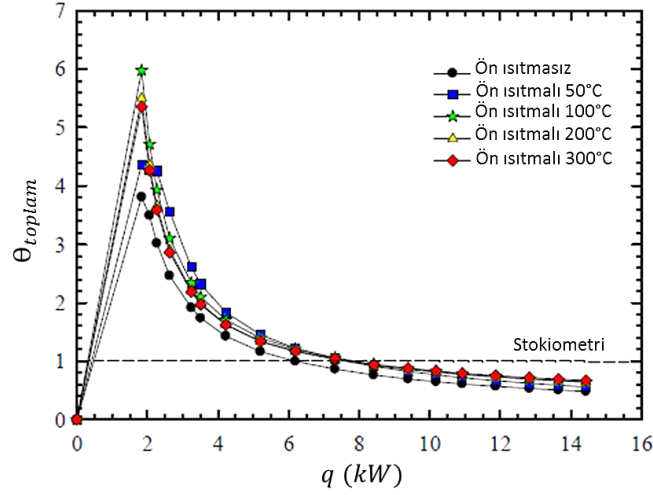
Şekil 4.16 Isı girişine ve ön ısıtma durumuna göre ikincil hava oranları

Isı girişinin artması demek karışımın hacimsel debisinin artması demektir. Karışımın yüksek hacimsel debi değerleri de güçlü momentum etkisine sebep olmakta ve böylelikle daha fazla hava sürüklenmektedir.

Toplam eşdeğerlik oranı karışımın zengin, fakir ya da stokiometrik olduğunu belirtmektedir. Bu oran aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\theta_{toplamlam} = \frac{100}{(PA + SA)} \quad (4.15)$$

Şekil 4.17' de doğal emişli bir yakıcıda bu eşitlik kullanılarak belirlenen toplam eşdeğerlik oranının ısı girişi ve ön ısıtma durumuna göre değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi 7 kW' dan düşük ısı girişlerinde sürüklenen hava miktarının az olması sebebiyle yakıtça zengin karışım oluşmaktadır. Yüksek ısı girişlerinde ise daha güçlü momentum etkisiyle daha fazla hava sürüklenmektedir. Böylece yakıtça fakir karışım oluşmaktadır.







Şekil 4.17 Isı girişine ve ön ısıtma durumuna göre toplam eşdeğerlik oranları

Yapılan bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar şu şekildedir:

- Yüksek momentum etkisi sayesinde ısı girişinin ( $q$ ) artmasıyla  $PA$  ve  $SA$  miktarları artmaktadır. Ayrıca ön ısıtma olduğu durumdaki  $PA$  ve  $SA$  değerleri ön ısıtma olmadığı durumdaki değerlere göre daha düşüktür. Bunun nedeni ön ısıtma etkisiyle karışımın genişmesi ve viskozitesinin artmasıdır.
- $PA_h$  değerinin belirlenmesi için kullanılan teorik bağıntı ile deneysel sonuçlar arasındaki maksimum sapma  $\pm 10\%$  olarak belirlenmiştir.
- Doğal emişli bir yakıcının toplam eşdeğerlik oranı için ilk teorik bağıntı önerilmiştir.

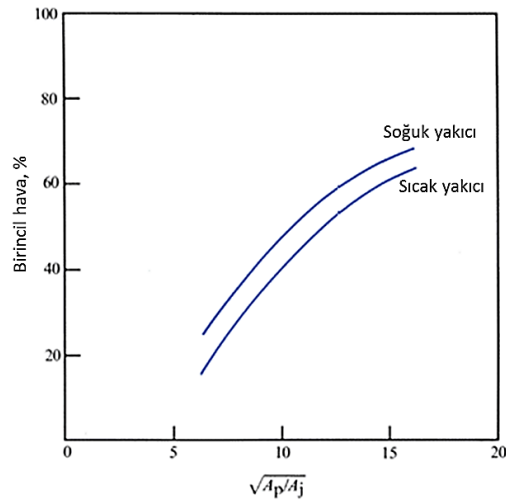
Prigg (1934) [7] yaptığı çalışmada dört farklı enjektör geometrisini karşılaştırmıştır. Karşılaştırılan enjektör geometrilerinin farkları enjektör delik uzunluğunun çapına oranları ve delik açılarıdır. Çizelge 4.1' de karşılaştırılan enjektör geometrileri ve bu enjektörlerin boşaltım katsayıları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Enjektör tiplerine göre boşaltım katsayıları

				
$\frac{\text{Enjektör delik uzunluğu}}{\text{Enjektör delik çapı}}$	0,58	3,5	0,8	1
Delik açısı	45°	55°	33°	40°
Boşaltım katsayısı	0,81	0,84	0,93	0,94

Yapılan çalışmanın sonucunda enjektör delik uzunluğunun delik çapına eşit olduğu durumda boşaltım katsayısının en yüksek değerde olduğu görülmüştür. Enjektör delik uzunluğu çapa göre çok uzunsa sürtünmeden kaynaklı enerji kayıpları artacaktır. Bu da enjektör delik uzunluğunun çapa oranı 3,5 olduğu durumdaki boşaltım katsayısı değerinin 0,84 olması ile doğrulabilir. Diğer durumda delik uzunluğu çapa göre çok kısaysa gaz geçişindeki ani genişlemeden dolayı enerji kaybı olacaktır. Çalışma sonucuna göre delik uzunluğunun çapa oranı 0,58 olduğu durumda boşaltım katsayısı 0,81 olarak bulunmuştur.

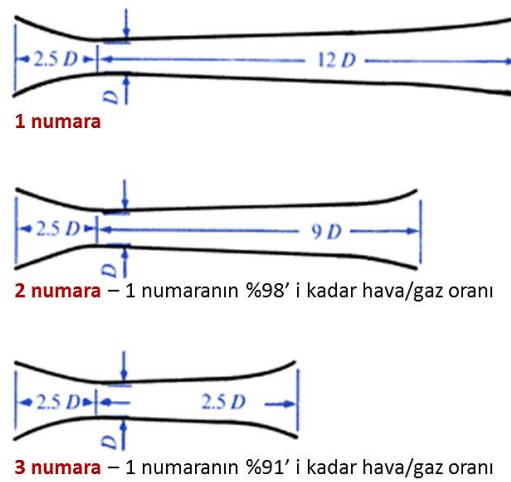
Harris ve Prigg (1965) [7] tarafından yapılan çalışmada kısmi ön karışimli bir yakıcı için yakıcı sıcaklığının birincil hava sürüklenmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. İki farklı yakıcı sıcaklığında (350°C ve 400°C) sürüklenen birincil hava miktarları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.18' de yapılan bu çalışmanın sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.18 Yakıcı sıcaklığının birincil hava sürüklenmesi üzerindeki etkisi

Yapılan bu çalışmanın sonucuna göre daha soğuk olan yakıcının ( $350^{\circ}\text{C}$ ), sıcak yakıcıya ( $400^{\circ}\text{C}$ ) göre daha fazla birincil hava sürüklediği görülmektedir. Şekilde  $A_p$  ventüri kanalı çıkış alanını,  $A_j$  ise enjektör delik alanını simgelemektedir. Bu çalışmadan çıkarılacak bir başka sonuç da ventüri kanalı çıkış alanının enjektör delik alanına oranı arttıkça sürüklenen birincil hava artmaktadır.

Berry ve arkadaşları (1921) [7] tarafından yapılan çalışmada farklı boyutlardaki ventüri kanalları üzerinde sürtünme kayıp katsayıları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.19' da karşılaştırılan üç farklı boyuttaki ventüri kanalı gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Ventüri kanalının uzunluğuna göre sürüklenen birincil hava oranları

Şekilden de görüldüğü gibi ventüri uzunluğu  $12D$ ' den  $9D$ ' ye indirildiği takdirde sürüklenen hava miktarı  $12D$  uzunluklu ventüri kanalının sürüklediği havanın %98' i kadar olmaktadır. Bu uzunluk  $2,5D$ ' ye indirildiği zaman ise  $12D$  uzunluklu ventüri kanalının sürüklediği havanın %98' i kadar hava sürüklenmektedir. Yapılan bu çalışmada ventüri kanalındaki sürtünme kayıp katsayısının en düşük seviyede olması için ventüri boğazı ile enjektör arasındaki uzaklığın, boğaz çapının 2 - 2,5 katı olması ve ventüri kanalının uzunluğunun boğaz çapının 10 – 12 katı olması gerektiği belirlenmiştir.

Namkhat ve Jugjai [15] tarafından yapılan çalışmada ısı girişinin ve ön ısıtılmış havanın sürüklenen birincil havaya etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuca göre ısı girişi arttıkça belli bir yere kadar sürüklenen birincil hava da artmaktadır. Daha sonradan sabit kalarak ısı girişinden bağımsız olmaktadır. Sürüklenen birincil havanın sabit kalmasının limiti olarak karışım odası ve yakıcı portlarının boyutu düşünülmektedir. Ayrıca alınan havanın

ön ısıtma sıcaklığı arttıkça sürüklenen birincil havanın azaldığı da belirlenmiştir. Bunun nedeni de havanın ısınmasıyla viskozitesinin artması ve böylece daha az hava girişi olmasıdır.

HAD analiz çalışmalarında kullanılabilecek türbülans modelleri ile ilgili de literatür araştırması yapılmıştır. Hemidi vd. [16] yaptıkları çalışmada supersonic hava ejektörüne HAD analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde türbülans modelleri de karşılaştırılmıştır. En iyi türbülans modelinin k-epsilon modeli olduğu belirlenmiştir.

Zhu vd. [17] tarafından yapılan çalışmada yüksek performanslı bir ejektör için geometrik parametreler incelenmiştir. HAD çalışması yapılarak ejektör geometrileri karşılaştırılmıştır. Yapılan doğrulama işlemiyle en uygun türbülans modelinin k-epsilon olduğu görülmüştür. Bu türbülans modelinin içinde de en uygun modelin k-epsilon RNG olduğuna karar verilmiştir.

Liu vd. [18] düşük NOx emisyonuna sahip bir yakıcı tasarımı üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmalarda HAD yaklaşımı ve deney karşılaştırılmıştır. HAD yaklaşımında türbülans modeli olarak k-epsilon türbülans modelinin kullanılmasına karar verilmiştir.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Ev tipi gazlı ocaklarda güç, verim ve emisyon deneyleri 2008 + A3: 2013 EN 30-1-1 standartlarına göre yapılmaktadır. Standartta belirtilen gazlar, Wobbe sayılarına göre üç aileye ayrılmaktadır. Çizelge 5.1 Wobbe sayılarına göre sınıflandırılan gaz ailelerini göstermektedir. [19]

Çizelge 5.1 Wobbe Sayısına göre gaz ailelerinin sınıflandırılması

Gaz Aileleri ve Grupları	15°C ve 1013,25 mbar' da Brüt Wobbe sayısı (MJ/m <sup>3</sup> )	
	Asgari	Azami
1. Aile Grup a	22,4	24,8
2. Aile Grup H Grup L Grup E	39,1 45,7 39,1 40,9	54,7 54,7 44,8 54,7
3. Aile Grup B/P Grup P	72,9 72,9 72,9	87,3 87,3 76,8

Wobbe sayısına göre sınıflandırılan gaz ailelerinin içerdiği gazlar ile bu gazların ana özellikleri ve bileşimleri de Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Farklı deney gazlarının ana özellikleri ve bileşimleri

Gaz aileleri ve grupları	Deney Gazları	Sembol	Hacimsel Bileşim %	Wobbe Sayısı (MJ/m <sup>3</sup> )	Üst Isıl Değer (MJ/m <sup>3</sup> )	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
1. Aile gazları						
Grup a	Referans gaz, Tam olmayan yanma, Alev kopma ve kurumlanma sınır gazı	G110	CH <sub>4</sub> =26 H <sub>2</sub> =50 N <sub>2</sub> =24	24,75	15,87	0,411
	Geri tepme sınır gazı	G112	CH <sub>4</sub> =17 H <sub>2</sub> =59 N <sub>2</sub> =24	22,36	13,56	0,367
2. Aile gazları						
Grup H	Referans gaz	G20	CH <sub>4</sub> =100	50,72	37,78	0,555
	Tam olmayan yanma, kurumlanma sınır gazı	G21	CH <sub>4</sub> =87 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =13	54,76	45,28	0,684
	Geri tepme sınır gazı	G222	CH <sub>4</sub> =77 H <sub>2</sub> =23	47,87	31,86	0,443
	Alev kopma sınır gazı	G23	CH <sub>4</sub> =92,5 N <sub>2</sub> =7,5	45,66	34,95	0,586
Grup L	Referans gaz ve geri tepme sınır gazı	G25	CH <sub>4</sub> =86 N <sub>2</sub> =14	41,52	32,49	0,612
	Tam olmayan yanma, kurumlanma sınır gazı	G26	CH <sub>4</sub> =80 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =7 N <sub>2</sub> =13	44,83	36,91	0,678
	Alev kopma sınır gazı	G27	CH <sub>4</sub> =82 N <sub>2</sub> =18	39,06	30,98	0,629
Grup E	Referans gaz	G20	CH <sub>4</sub> =100	50,72	37,78	0,555

	Tam olmayan yanma, kurumlanma sınır gazı	G21	CH <sub>4</sub> =87 C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =13	54,76	45,28	0,684
	Geri tepme sınır gazı	G222	CH <sub>4</sub> =77 H <sub>2</sub> =23	47,87	31,86	0,443
	Alev kopma sınır gazı	G231	CH <sub>4</sub> =85 N <sub>2</sub> =15	40,9	32,11	0,617
3. Aile gazları						
Grup 3B/P	Referans gaz, Tam olmayan yanma, kurumlanma sınır gazı	G30	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> =50 i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> =50	87,33	125,81	2,075
	Alev kopma sınır gazı	G31	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =100	76,84	95,65	1,550
	Geri tepme sınır gazı	G32	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> =100	72,86	88,52	1,476
Grup 3P	Referans gaz, Tam olmayan yanma, kurumlanma sınır gazı, alev kopma sınır gazı	G31	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> =100	76,84	95,65	1,550
	Geri tepme ve kurumlanma sınır gazı	G32	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> =100	72,86	88,52	1,476

Deneylerde kullanılan gazlar uygun deney basınçlarına ayarlanmalıdır. Kullanılan gazların nominal, minimum ve maksimum basınçları Çizelge 5.3' de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Deney gazlarının basınçları

Cihaz Kategorisi	Deney Gazı	P <sub>n</sub> mbar	P <sub>min</sub> mbar	P <sub>maks</sub> mbar
1. Aile gaz : 1a	G110, G112	8	6	15
2. Aile gaz : 2H	G20, G21, G222, G23	20	17	25



2. Aile gaz : 2L	G25, G26, G27	25	20	30
2. Aile gaz : 2E	G20, G21, G222, G231	20	17	25
3. Aile gaz : 3B/P	G30, G31, G32	29	25	35
	G30, G31, G32	50	42,5	57,5
3. Aile gaz : 3P	G31, G32	37	25	45
	G31, G32	50	42,5	57,5
2. Aile gaz : 2E+	G20, G21, G222	20	17	25
	G231	25	17	30
3. Aile gaz : 3+ (çift 28-30/37)	G30	29	20	35
	G31, G32	37	25	45
3. Aile gaz : 3+ (çift 50/67)	G30	50	42,5	57,5
	G31, G32	67	50	80

Bu tez çalışmasında kullanılan referans yakıcı, 3. bölümde bahsedilen birden fazla alev halkasına sahip yakıcıdır. Yapılan güç, verim ve emisyon deneylerinde doğalgaz (G20) kullanılmıştır.

## 5.1 Güç Deneyi

Yakıcının gücünün belirlenmesi için 300 mm çapındaki yuvarlak tencereye 3 kg su eklenmiştir. G20 gazı kullanılarak 20 mbar basınçta 10 dakikalık ön ısıtma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 10-13. dk. arasında debimetreden geçen gaz miktarı belirlenmiş ve geçiş süresi de ölçülmüştür. Deney sonucu alınan verilere göre yakıcının gücü Eşitlik (5.1)' den hesaplanmaktadır.

$$q = 278. f. \dot{V}. CV \quad (5.1)$$

Burada  $q$  yakıcının gücü (W),  $\dot{V}$  hacimsel debi ( $m^3/h$ ),  $CV$  kullanılan gazın (bu tezde doğalgaz) üst ısıl değeri ( $MJ/m^3$ ) ve  $f$  de düzeltme faktörüdür. Gaz sıcaklığı ve ortam basıncına göre hesaplanan gücü düzeltmektedir.

$$f = \sqrt{\frac{1013,25 + P}{1013,25} \cdot \frac{P_a + P}{1013,25} \cdot \frac{288,15}{273,15 + t_g} \cdot \frac{\rho}{\rho_r}} \quad (5.2)$$

Düzeltilme faktörü eşitliğinde  $P$  gaz basıncı (mbar),  $P_a$  ortam basıncı (mbar),  $t_g$  gaz sıcaklığı (°C),  $\rho/\rho_r$  ise yoğunluk oranıdır. Yoğunluk oranı şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\frac{\rho}{\rho_r} = \frac{P_a + P - P_{ws} + 0,622 \cdot P_{ws}/\rho_r}{P_a + P} \quad (5.3)$$

$P_{ws}$  ise  $t_g$  sıcaklığında doymuş buhar basıncıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{ws} = \exp\left(21,094 - \frac{5262}{273,15 + t_g}\right) \quad (5.4)$$

Yapılan deneyde 185 saniyede 25 litre doğalgaz geçtiği ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre referans yakıcının gücü 5100 W çıkmıştır.

## 5.2 Verim Deneyi

Ev tipi yakıcılarda arka arkaya iki farklı verimden bahsetmek mümkündür:

- Yanma verimi: Yanma sonu ortaya çıkan ısı miktarının, yakıcıya gönderilen yakıtın tam yanması sonucu ortaya çıkabilecek ısı miktarına oranıdır.
- Isı aktarma verimi: Yanma sonu ortaya çıkan ısının ısıtılacak yere (tencereye) aktarılma verimidir.

Yapılan verim deneyinde ise bu iki verim birden hesaplanmaktadır. Verim deneyinin amacı, yakıcıya gönderilen yakıtın tam yanması sonucu ortaya çıkabilecek ısı miktarının ne kadarının tencereye aktarıldığını hesaplayabilmektir.

Verim deneyinde öncelikle Şekil 5.1' de gösterildiği gibi 220 mm çapındaki tencereye 3,7 kg su eklenmekte ve 10 dakika ön ısıtma gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.1 Verim deneyinde 220 mm çapındaki tencereyle ön ısıtma

Verim deneyi esnasında gaz nominal basıncında yakıcıya gönderilir. Standartta göre ön ısıtma sürecinde yakıcının gücü standart karşılaştırma yapabilmek için 4200 W' a kısılması gerekmektedir. Bu kısma işlemde öncelikle 4200 W yakıcı gücü elde edebilmek için 1 litre gazın debimetreden ne kadar sürede geçmesi gerektiği hesaplanmalıdır. Deneyin ön ısıtmadan sonraki etabında ise Şekil 5.2' de gösterildiği gibi 300 mm çapındaki bir tencerenin içine 9,4 kg su eklenmesi gerekmektedir. Ayrıca tencerenin içindeki su sıcaklığını okuyabilmek için termometreye de ihtiyaç vardır. Bu termometre, tencere kapağına özel olarak açılmış delikten geçirilerek suyun orta noktasına gelecek şekilde yerleştirilir.



Şekil 5.2 Verim deneyi düzeneği

Başlangıç sıcaklığı olarak su sıcaklığının  $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ ' ye getirilmesi gerekmektedir. Su sıcaklığı  $90\pm 1^{\circ}\text{C}$  olduğunda (yani başlangıca göre su sıcaklığı farkı  $70^{\circ}\text{C}$  olduğunda) musluk kapatılarak yakıcıya gönderilen gaz kesilir ve deney sonlandırılır.

Deney esnasında ortamın basıncı, gaz sıcaklığı, tencere içindeki suyun ilk ve son sıcaklıkları, ön ısıtmadan sonraki deney boyunca kullanılan gaz miktarı kullanılarak verim şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$Verim = \frac{m_e \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1)}{f \cdot V \cdot CV} \cdot 100 \quad (5.5)$$

Burada  $m_e$  eşdeğer kütle (kg),  $C_p$  suyun ısı kapasitesi (MJ/(kg.°C)),  $t_2$  suyun son sıcaklığı (°C),  $t_1$  suyun ilk sıcaklığı (°C),  $f$  düzeltme faktörü,  $V$  kullanılan gazın hacmi (m<sup>3</sup>) ve  $CV$  gazın ısı değerini (MJ/m<sup>3</sup>) göstermektedir.

Eşdeğer kütle ( $m_e$ ) hesaplanırken tencere ve kapağının kütlesi de göz önünde bulundurulmaktadır. Suyun kütlesi  $m_1$ , tencere ve kapağının kütlesi  $m_2$  ise eşdeğer kütle şu şekilde bulunur.

$$m_e = m_1 + 0,213 \cdot m_2 \quad (5.6)$$

Düzeltilme faktörü de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$f = \frac{P_a - P - P_{ws}}{1013,25} \cdot \frac{288,15}{273,15 + t_g} \quad (5.7)$$

Burada  $P_a$  ortam basıncı (mbar),  $P$  gaz basıncı (mbar),  $P_{ws}$  doymuş buhar basıncı ve  $t_g$  gaz sıcaklığını (°C) göstermektedir. Doymuş buhar basıncı Eşitlik (5.4)' deki hesaplanmaktadır. [20]

Referans yakıcıya yapılan verim deneyinde doğalgaz kullanmıştır. Öncelikle 220 mm çapındaki tencereye 3,7 kg su eklenerek 20 mbar gaz basıncında 10 dakika boyunca ön ısıtma yapılmıştır. Yakıcı gücünün 4200 W olabilmesi için debimetreden 1 litre gazın kaç saniyede geçmesi gerektiği şu şekilde bulunmuştur.

$$\frac{5100 \text{ W} \times (185 \text{ s} / 25 \text{ l})}{4200 \text{ W}} = 9 \text{ s/l}$$

Bu hesaba göre yakıcı gücünün 4200 W olabilmesi için debimetreden 1 litre gazın 9 saniyede geçmesi gerekmektedir. 10 dakikalık ön ısıtma süresinde bu ayar yapılarak yakıcı gücü 4200 W' a kısılmıştır.

10 dakikalık ön ısıtma tamamlandığında 220 mm çapındaki tencere ızgara üzerinden alınarak önceden hazırlanmış içinde 20°C sıcaklığında ve 9,4 kg ağırlığında su bulunan 300 mm çapındaki tencere ızgara üzerine yerleştirilmiştir. Su sıcaklığı 90°C' ye ulaştığında musluk kapatılarak yakıcıya gönderilen gaz kesilmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler şu şekildedir.

- Suyun ilk sıcaklığı : 20°C
- Suyun son sıcaklığı : 91°C
- Deney başlangıcındaki debimetre değeri : 8,233 m<sup>3</sup>
- Deney sonundaki debimetre değeri : 8,3745 m<sup>3</sup>
- Ortam basıncı : 1022 mbar
- Gaz sıcaklığı : 24,5°C
- Suyun kütlesi : 9,4 kg
- Tencere ve kapağın toplam kütlesi : 1,46 kg
- Suyun ısı kapasitesi : 0,004186 MJ/(kg.°C)
- Gaz basıncı : 20 mbar
- Doğalgazın üst ısı değeri : 37,78 MJ/m<sup>3</sup>

Elde edilen verilere göre doymuş buhar basıncı hesabı şu şekildedir.

$$P_{ws} = \exp\left(21,094 - \frac{5262}{273,15 + t_g}\right) = \exp\left(21,094 - \frac{5262}{273,15 + 24,5}\right) = 30,433$$

Düzeltilme faktörü de aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$f = \frac{P_a - P - P_{ws}}{1013,25} \cdot \frac{288,15}{273,15 + t_g} = \frac{1022 + 20 - 30,433}{1013,25} \cdot \frac{288,15}{273,15 + 24,5} = 0,967$$

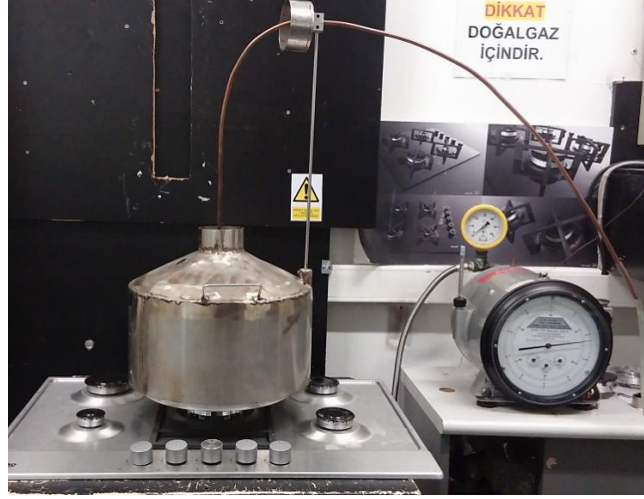
Eşdeğer kütle ise  $m_e = m_1 + 0,213 \cdot m_2 = 9,4 + 0,213 \cdot 1,46 = 9,71 \text{ kg}$  olarak hesaplanmıştır. Bu durumda referans yakıcının verimi şu şekildedir.

$$\text{Verim} = \frac{m_e \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1)}{f \cdot V \cdot CV} \cdot 100 = \frac{9,71 \cdot 0,004186 \cdot (91 - 20)}{0,967 \cdot (8,3745 - 8,233) \cdot 37,78} \cdot 100 = 55,8$$

Yapılan verim deneyine göre referans yakıcının verim **%55,8** bulunmuştur.

### 5.3 Emisyon Deneyi

Yanma sonu ürünleri incelenmek istenen yakıcının gücü 4200 W' dan düşük ise 220 mm çapında yuvarlak bir tencere içine 2 kg su eklenerek deney yapılmaktadır. Yakıcı gücü 4200 W' dan yüksek olduğu durumda ise 300 mm çapındaki yuvarlak bir tencerenin içine 3 kg su eklenmektedir. Tencerenin üzerine ölçüleri standartlarda belirlenmiş olan numune alma aparatı Şekil 5.3' de gösterildiği gibi yerleştirilmektedir.



Şekil 5.3 Numune alma aparatının yerleşimi



Şekil 5.4 CO-CO<sub>2</sub> Gaz analizörü

Numune alma aparatının bağlantı borusu tencere üzerinde dik konumdadır ve aparatın çıkışındaki hortum Şekil 5.4' de gösterilen CO-CO<sub>2</sub> gaz analizörüne bağlanmaktadır. Bu analizör SIEMENS marka ULTRAMAT 23 model gaz analizörü olup yanma ürünlerinin analizi için kullanılmaktadır.

Aparatın üst kısmından yanma ürünü gazların bazıları ayrıştırılarak alınmaktadır. Emisyon deneyi esnasında musluk tam açık konumda ve gaz basıncı da P<sub>maks</sub> değerinde olmaktadır. 20 dakika boyunca veri toplanması beklenmekte ve 20. dakikanın sonunda analizör ekranında görülen (CO)<sub>M</sub> ve (CO<sub>2</sub>)<sub>M</sub> değerleri kaydedilmektedir. Deney sonunda hava bulundurmeyen kuru yanma ürünlerine göre CO içeriğinin hacimsel yüzdesi şu şekilde bulunmaktadır.

$$\%(CO)_N = \%(CO)_M \times \frac{\%(CO_2)_N}{\%(CO_2)_M} \quad (5.8)$$

Bu eşitlikte:

$\%(CO)_N$  : Hava bulundurmeyen kuru yanma ürünlerine göre CO içeriğinin hacimsel yüzdesi,

$\%(CO_2)_N$  : Hava bulundurmeyen kuru yanma ürünleri için hesaplanmış CO<sub>2</sub>' nin hacimsel yüzdesi,

$\%(CO)_M$  ve  $\%(CO_2)_M$  : Yanma deneyi esnasında kuru numunede ölçülen CO ve CO<sub>2</sub>' nin hacimsel yüzdesi olarak ifade edilmektedir.

Deney gazları için  $\%(CO_2)_N$ ' nin % değerleri Çizelge 5.4' de gösterilmektedir.

Çizelge 5.4 Deney gazları için CO<sub>2</sub> hacimsel yüzdesi

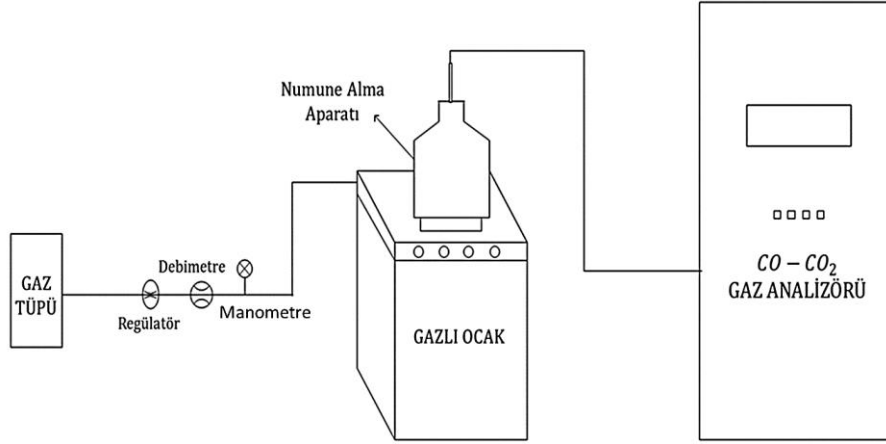
Gazın Gösterimi	G110	G120	G130	G140	G141	G150	G20	G21	G25	G26	G30	G31
$\%(CO_2)_N$ (nötr yanma)	7,6	8,35	13,7	7,8	7,9	11,8	11,7	12,2	11,5	11,9	14	13,7

Emisyon deneyleri, deneylerde kullanılan gazın P<sub>maks</sub> basıncında yapılmaktadır. Kullanılan deney gazlarının yanma ürünlerinde bulunabilecek azami CO içeriği Çizelge 5.5' de verilmektedir.

Çizelge 5.5 Yanma ürünlerinde bulunabilecek azami CO miktarı

Deney No	Çalışmada olan bekler	Kullanılan gazlar	Musluk düğmesinin konumu	%CO Azami
1	Her bek tek tek	Her bir referans gaz	Tam açık	0,10
2	Her bek tek tek	Her bir referans gaz	½ anma ısı yüküne karşılık gelecek konum	0,15
3	Her bek tek tek	Tam olmayan yanma sınır gazı	Tam açık	0,15
4	Bek tablasının bütün bekleri	Her bir referans gaz	Tam açık	0,20

Emisyon ölçümü için kullanılan deney düzeneğinde CO-CO<sub>2</sub> gaz analizörü, numune alma aparatı, gazlı ocak, manometre, debimetre, regülatör ve gaz tüpü bulunmaktadır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 5.5’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.5 Emisyon deney düzeneğinin şematik gösterimi

Referans yakıcıya uygulanan emisyon deneyinde, yakıcının gücü (5100 W) 4200 W’ dan fazla olduğu için 300 mm çapında yuvarlak bir tencere kullanılmıştır. Tencerenin içine 3 kg su eklenmiştir ve üzerine standartlarda ölçüleri belirlenmiş olan numune alma aparatı yerleştirilmiştir. Bu aparatın çıkışındaki hortum ise analizöre bağlanmıştır. Deneyde doğalgaz (G20) kullanılmıştır ve basınç G20 için emisyon basıncı olan  $P_{maks} = 25$  mbar basınca regülatör aracılığıyla ayarlanmıştır. Deney başlayıp 20. dakikanın sonuna gelindiğinde analizör ekranında görülen yanma esnasında kuru numunede ölçülen CO ve CO<sub>2</sub>’ nin hacimsel yüzdeleri kaydedilmiştir. Çizelge 5.4’ de gösterildiği gibi hava



bulandırmayan kuru yanma ürünleri için hesaplanmış CO<sub>2</sub>' nin hacimsel yüzdesi 11,7 olarak verilmiştir.

Deneyin bitiminde analizör ekranında görülen değerler şu şekildedir.

$$(CO)_M = 185$$

$$(CO_2)_M = 3,73$$

$$\%(CO)_N = \%(CO)_M \times \frac{\%(CO_2)_N}{\%(CO_2)_M} = 185 \times \frac{11,7}{3,73} = 580$$

Deney sonuçlarına göre referans yakıcının emisyon değeri **580 ppm** çıkmıştır.

İki alev halkasına sahip yüksek güçlü ve yüksek verimli referans yakıcıya yapılan güç, verim ve emisyon deneylerinin toplu sonuçları Çizelge 5.6' da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Referans yakıcının deney sonuçları

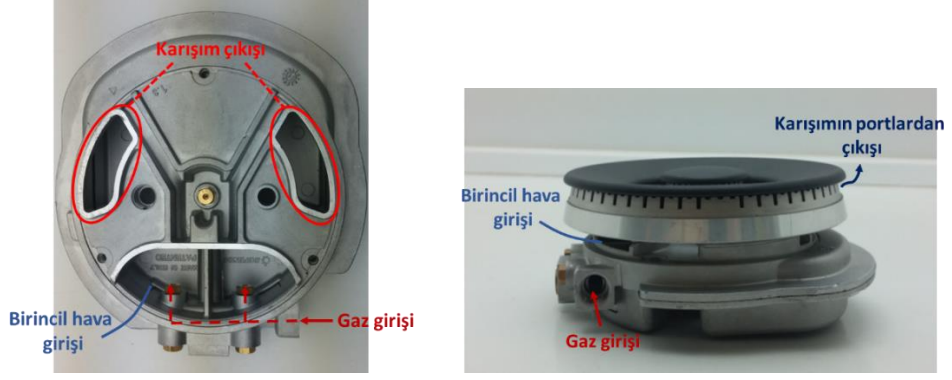
<b>REFERANS YAKICI</b>	<b>Güç</b>	<b>Verim</b>	<b>Emisyon</b>
	5100 W	%55,8	580 ppm

Referans yakıcıya yapılan standart deneyler sonucu doğalgaz için yakıcının gücü, verimi ve emisyonu belirlenmiştir. Ayrıca Fluent programında yapılan parametrik soğuk akış analizleri sonucunda uygun birincil hava emişini sağlayacak optimum yakıcı boyutları belirlenmiş ve bu boyutlarda yakıcı üretilmiştir. Üretilen yeni yakıcıya da güç, verim ve emisyon deneyleri yapılarak son bölümde referans yakıcıyla karşılaştırılmıştır.

#### 5.4 Hacimsel Debi Ölçümü

Fluent programıyla yapılan sayısal modellemeyi doğrulayabilmek için yakıcı üzerinde deneysel olarak soğuk hacimsel debi ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.6' da referans olarak belirlenen yakıcıda gaz giriş kısmı ve birincil hava emişinin sağlandığı bölge gösterilmiştir. Bu deneydeki asıl amaç karışımın portlardan çıkıştaki hacimsel debisini ölçerek nümerik olarak yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırmaktır.



Şekil 5.6 Referans yakıcıdaki gaz girişi ve birincil hava emişi

Enjektörden hızla çıkan gaz, jet etkisiyle etrafında negatif basınç oluşturmakta ve jet etrafındaki havayı da sürükleyerek ventüri kanalına girmektedir. Gaz ve birincil hava karışım odasında karışmakta ve daha sonra portlardan atmosfere açılmaktadır. Mini rüzgar tüneli kullanılarak gerçekleştirilen debi ölçümünde amaç portlardan çıkan karışım debisini elde etmektir. Yanma işleminin olduğu durumda debi değerlerine bakılmadığından debi ölçümü yanma olmadan soğuk akış yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yanma olmadığından gaz olarak doğalgaz göndermek çok riskli bir durum olması sebebiyle doğalgaz yerine hava gönderilmiştir. Normal şartlarda bu yakıcı için enjektörden çıkan gaz hızı hesaplanmıştır. Daha sonra gazla aynı akış rejimine ulaşabilecek ve gazın yerine debi ölçümünde kullanılacak havanın hızı hesaplanmıştır. Reynolds sayısı akış rejimlerini tanımladığı için gazın Reynolds sayısı ile havanın Reynolds sayısı eşitlenmiş ve enjektörden çıkan havanın sahip olması gereken hıza ulaşılmıştır.

Enjektörden çıkan gaz hızını bulabilmek için debi kesit alanına bölünmektedir. Böylelikle enjektörden çıkan gaz hızı  $U_g$  olarak hesaplanmıştır.

Doğalgazın çok büyük bir bölümü metan gazından oluştuğu için doğalgaz metan gazı olarak düşünülebilmektedir. Standart oda koşullarında (25°C sıcaklık ve 1 atm basınç):

- $CH_4$ ' ün yoğunluğu :  $0,655 \text{ kg/m}^3$
- $CH_4$ ' ün dinamik viskozitesi :  $1,111 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
- Havanın yoğunluğu :  $1,184 \text{ kg/m}^3$
- Havanın dinamik viskozitesi :  $1,849 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$  olmaktadır.

Bu durumda Reynolds sayılarını eşitlediğimizde gazla aynı akış rejimine ulaşan havanın hızını bulmaktayız.

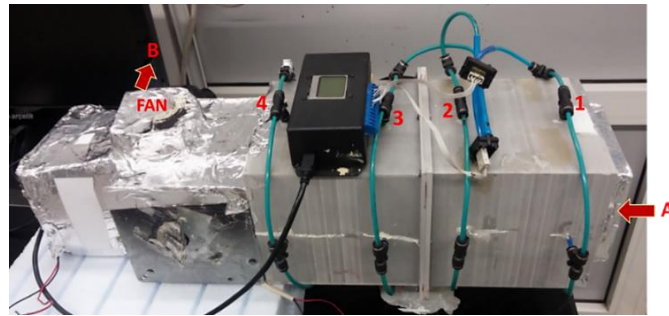
$$Re = \frac{\text{Atalet Kuvvetler}}{\text{Viskoz Kuvvetler}} = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (5.9)$$

$$Re_{hava} = Re_{CH_4} \rightarrow \frac{(1,184 \text{ kg/m}^3) \cdot U_h}{(1,849 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s})} = \frac{(0,655 \text{ kg/m}^3) \cdot U_g}{(1,111 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s})}$$

Bu eşitliğe göre, debi ölçümünde gaz yerine hava kullandığımız zaman gazla aynı akış rejimine ulaşması için gerekli olan hava hızı  $U_h$  olarak bulunmaktadır.

Havanın dış halkayı besleyen enjektörlerden  $U_h$  ' lik hızla çıkması için enjektörden geçmesi gereken debi enjektör deliğinin kesit alanı ile çarpılmasıyla elde edilir.

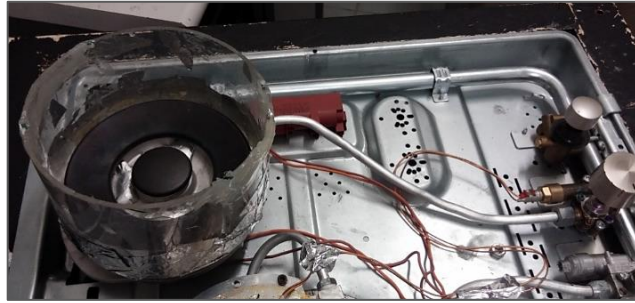
Hacimsel debi ölçümünde iç halkayı besleyen enjektör kapatılmıştır. Sadece dış halkayı besleyen enjektörler açıktır ve hava emişi dış kısımdan sağlanmaktadır. Dış halkayı besleyen enjektörler eşit çapa sahip olduklarından hızları ve debileri de aynı olmaktadır. Enjektör çıkışında istenilen hıza ulaşabilmesi için sadece bir enjektörde  $\dot{V}_h$  ' lık debi geçmesi gerekiyorsa iki enjektörden geçmesi gereken toplam debi  $2\dot{V}_h$  olmaktadır. Hacimsel debimetre kullanılarak yakıcıya gönderilen gazın (havanın)  $2\dot{V}_h$  ' lık debide geçmesini sağlayacak basınç ayarlanmıştır. Referans yakıcı üzerindeki hacimsel debi ölçümü, ayarlanan basınçta mini rüzgar tüneli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7' de debi ölçümünde kullanılan mini rüzgar tüneli gösterilmektedir.



Şekil 5.7 Mini rüzgar tüneli

Şekil 5.7' de gösterilen mini rüzgar tünelinin A kısmına debisini ölçmek istediğimiz referans yakıcı bağlanmıştır. B kısmı ise havanın tünelden çıkışının sağlandığı kısımdır. Fan kullanılarak havanın A' dan B' ye doğru akımı sağlanmaktadır. Deney esnasında 3

farklı noktadan basınç ölçümü alınmıştır. Tünelde basınç ölçümü için kullanılacak mevcut 4 manometre bulunmasına rağmen bu deneyde 1, 2 ve 3 numaralı 3 manometre kullanılmıştır. 4 numaralı manometre debisini ölçmek istediğimiz ürünü B tarafına bağlamamız durumunda etkin hale getirilmektedir. Bu deneyde yakıcı A tarafına bağlandığı için 4 numaralı manometre kullanılmamıştır. Debi ölçümü esnasında fan devri değiştirilerek 1 numaralı manometredeki etkin basınç sıfıra getirilmiştir. 1 numaralı manometrenin bulunduğu kesitin etkin basıncının sıfıra getirilmesinin amacı bu kesitin basıncının atmosfer basıncı yapılmasıyla bu kesite kadar olan kayıpların göz ardı edilerek ölçümü etkilemesinin önlenmesidir. Ayrıca 2 ve 3 numaralı manometrelerin buldukları kesitlerin kesit alanları farklıdır. Tünelin ölçüm mantığı 2 ve 3 numaralı manometrelerin buldukları kesitlerdeki basınç değerlerinden Bernoulli denklemi yardımıyla çıkış kısmındaki hacimsel debinin belirlenmesidir. Tünelde 1 numaralı manometredeki basıncın sıfıra getirilmesiyle çıkış kısmındaki hacimsel debi direk olarak verilmektedir. Şekil 5.8’ de A kısmına bağlanan yakıcı ve bağlantı kısmı gösterilmiştir.

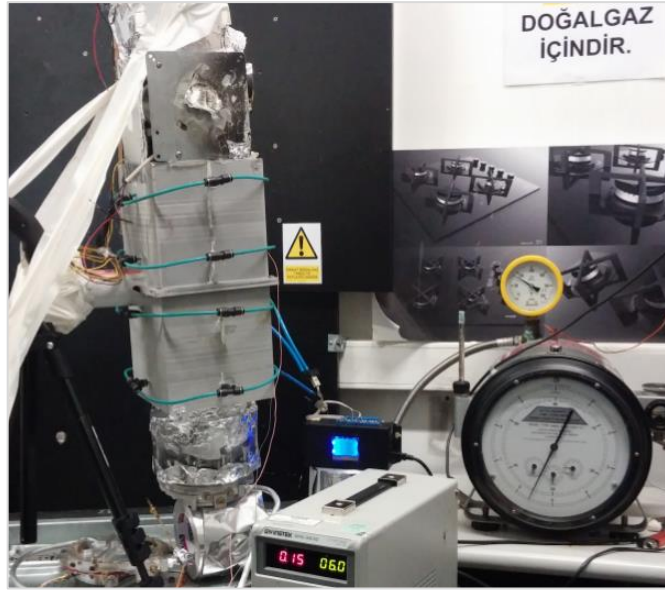


Şekil 5.8 Hacimsel debi ölçümü için referans yakıcının bağlantısı

Şekil 5.9’ da yakıcının tünele bağlanmış halindeki gaz giriş kısmı ve birincil hava emiş bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Tünelde bağlanmış durumdaki referans yakıcı



Şekil 5.10 Hacimsel debi ölçüm düzeneği

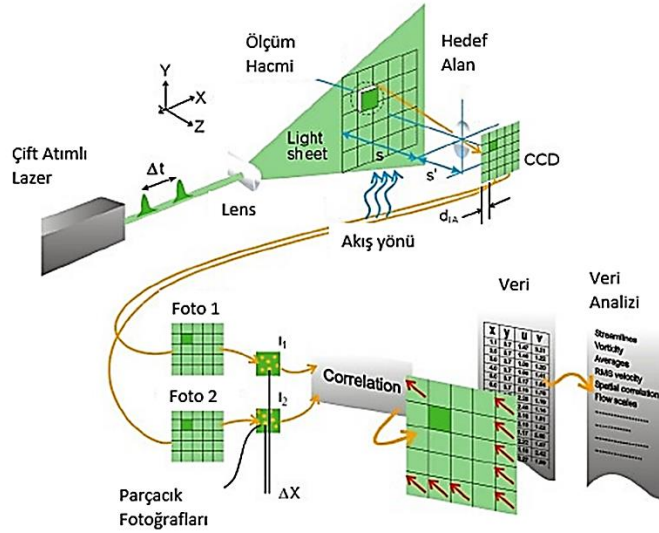
Referans yakıcının sahip olduğu portlardan çıkan karışımın hacimsel debisini ölçmek için kurulan deney düzeneği Şekil 5.10' da gösterilmiştir. Kurulan bu deney düzeneğinde yakıcıya gönderilen gazın (havanın)  $2\dot{V}_h$  'lık debide geçmesini sağlayacak basınç ayarlanmış ve Şekil 5.7' de 1 numara ile gösterilen manometredeki basınç değeri fanın devri değiştirilerek sıfıra getirilmiştir. Böylelikle yakıcının sahip olduğu portlardan çıkan karışımın hacimsel debisi ölçülmüştür.

### 5.5 PIV Sistemiyle Akış Görselleme

Tez kapsamında Fluent programında yapılan sayısal modellemeyi doğrulayabilmek için PIV (Particle Image Velocimetry) sistemi kullanılmıştır. PIV sisteminde akış görsellenerek hız dağılımları belirlenmiştir. PIV tekniği akışın kesitindeki ani hız vektörlerinin ölçümünü sağlayan bir sistemdir.

PIV sisteminde hız vektörleri, iki ışık darbesi arasında parçacıkların hareketi değerlendirilerek çıkarılmaktadır. Ölçüm esnasında çözünürlüğü yüksek ve ışığa duyarlı kamera görselleme yapılacak kısma odaklanmaktadır. Kullanılan kamera her ışık darbesini ayrı görüntü çerçevelerinde yakalayabilmektedir. İki ışık darbesi kaydedildikten sonra elde edilen görüntü çerçeveleri küçük bölümlere bölünmektedir. Görüntü çerçevelerinin küçük bölümlerinde çapraz korelasyon yöntemi kullanılarak hız vektörlerine ulaşılmaktadır. Kamera tarafından yakalanan iki görüntü çerçevesinin her

küçük bölümü için çapraz korelasyon tekrarlanarak tüm hedef alan üzerindeki hız dağılımı haritası elde edilmektedir. Şekil 5.11’ de standart bir PIV sisteminin ölçüm düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



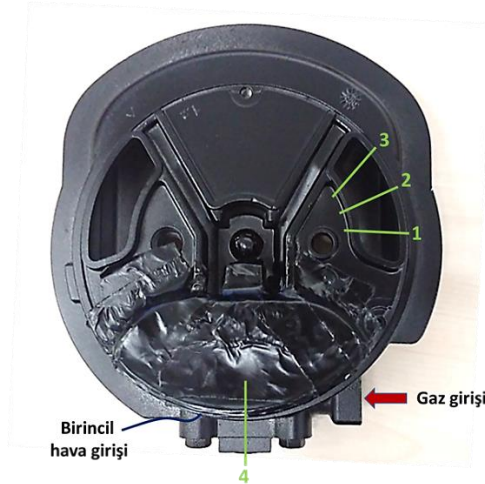
Şekil 5.11 PIV sistemi ölçüm düzeneği şematik gösterimi

PIV sistemiyle ölçüm yapılırken akışa, akışı takip edebilecek boyutta parçacıklar katılmaktadır. Bu sayede parçacıklar takip edilerek hız vektörlerine ulaşılmaktadır. Akışa parçacık katma işlemi hava akışlarında duman jeneratörü ile yapılmaktadır. Bir düzlemde tek kamera kullanılarak iki hız bileşeni hesaplanabilmektedir. Ayrıca ikinci bir kamera kullanıldığı durumda aynı düzlemdeki üçüncü hız bileşeni de hesaplanabilmektedir.

PIV sistemi kullanılarak yapılan bu çalışmada akışa katılan parçacıkların ortalama çapı 1,5 mikrometredir ve kullanılan parçacıklar yağ dumanından elde edilmiştir. Parçacıkların aydınlatılmasında ışık kalınlığının ve aydınlatma zamanlamasının hassas olarak ayarlanması gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada da ışık kalınlığı ve aydınlatma zamanlaması ayarlanabilen, 532 nanometre dalga boyunda ışık veren, NewWave Solo III Nd:YAG lazer kullanılmıştır. Lazerin maksimum ışık verme hızı 15 Hz’ dir. Maksimum performansta ışına yapabildiği enerji 50 mJ’ dür. Ayrıca parçacıkların görüntüleri 12-bit HiSense Mk II kamera ile kaydedilmiştir. Kameranın maksimum çözünürlüğü 1344 x 1024 pikseldir. Piksel boyutları 6.45 x 6.45 mikrometredir. Sistemde kullanılan kamera lazer düzlemine dik bir şekilde yerleştirilmiştir. Maksimum çekim hızları single frame modunda 12.2 Hz, double frame modunda 6 Hz’ dir.

Tez kapsamında nümerik modellemeyi doğrulayabilmek amacıyla referans yakıcının karışım odasından çıkan karışımın farklı kesitlerdeki hız dağılımları PIV sistemiyle incelenmiştir. PIV sisteminde kullanılan lazer, referans yakıcıda ölçüm alınacak kesiti aydınlatmaktadır. Bu esnada lazerin kestiği yerlerde parlaması durumunda kamera ile çekilen görüntülerde parçacıkların hareketi izlenememekte ve hız vektörleri görülememektedir. Böyle bir durumu engellemek amacıyla referans yakıcı Şekil 5.12' de görüldüğü gibi siyaha boyanmıştır. Bu sayede hız vektörlerinin çıkarımını engelleyecek olası parlamalar engellenmiştir.

Şekil 5.12' de gösterildiği gibi hız dağılımlarının belirlenmesi için 4 farklı kesit belirlenmiştir. 1, 2 ve 3 numaralı kesitlerden gaz ve birincil hava karışımı çıkarken 4 numaralı kesitten birincil hava girmektedir.



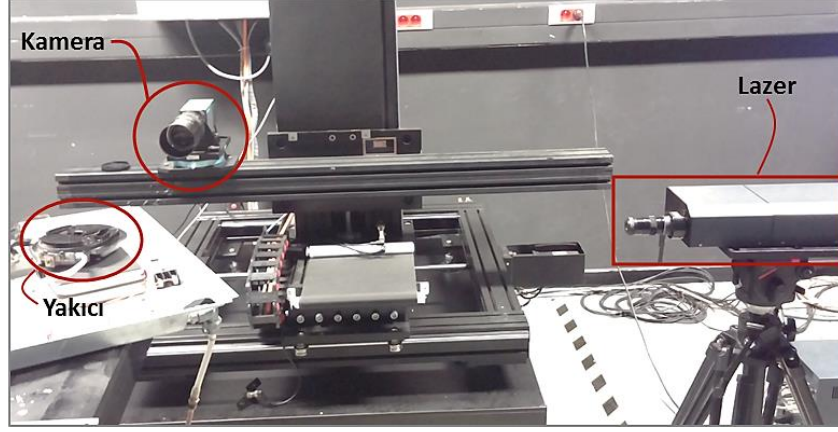
Şekil 5.12 PIV sistemi ile akış görsellemesi yapılan referans yakıcı

Yanma anında belirtilen kesitlerdeki hız dağılımları çıkarılamamaktadır. Bu yüzden PIV sistemi ile ölçüm esnasında yanma işlemi olmadan soğuk akışta belirtilen kesitlerdeki hız dağılımları belirlenmiştir. Yanma olmadan soğuk akış olduğu için gaz olarak doğal gaz kullanmak riskli bir durumdur. Bu yüzden gaz girişinden hacimsel debi ölçümünde olduğu gibi hava gönderilmiştir. Hacimsel debi ölçümünde hava gönderimi için belirlenen basınç değeri bu deneyde de kullanılmıştır. Yakıcıya gönderilen havanın basıncı ayarlanarak enjektörden çıkan havanın hızının  $U_h$  olması sağlanmıştır. [Yakıcıya gönderilen havanın hızının ve basıncının belirlendiği hesaplar Bölüm 5.4' de yapılmıştır.] Referans yakıcı üzerinde yapılan ölçümde yakıcı kafası kullanılmadan sadece karışım

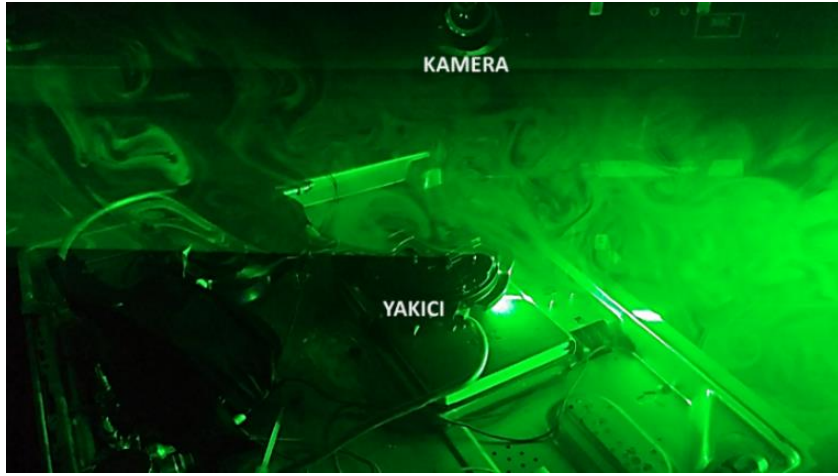


odası kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Bunun nedeni yakıcı kafasında bulunan portların konumunun hız vektörlerinin belirlenmesi için elverişli olmamasıdır. Daha etkin hız vektörleri için Şekil 5.12' de gösterilen kesitlerde sırasıyla ölçüm yapılmıştır.

Ölçüm için hazırlanan deney düzeneği Şekil 5.13' de gösterilmiştir. Ayrıca deney esnasından bir görüntü de Şekil 5.14' de verilmiştir.



Şekil 5.13 PIV sistemi deney düzeneği

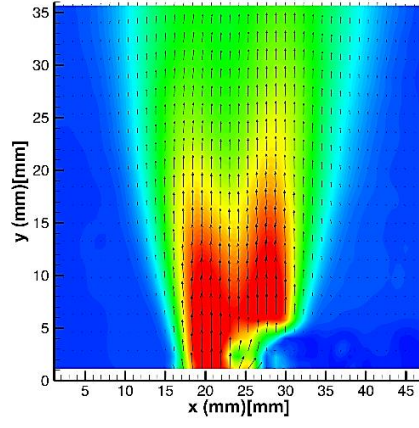


Şekil 5.14 PIV sistemi ile akış görselleme

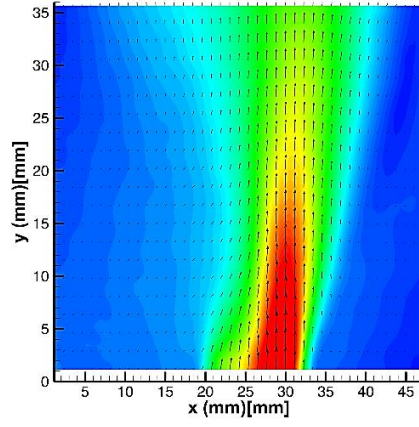
Yapılan ölçüm sonuçlarına göre kesitlerdeki ortalama hız dağılımları Şekil 5.15' den Şekil 5.18' e kadar verilmiştir. Ortalama hız dağılımları 500 görüntünün değerlendirilip ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Şekil 5.15' de görülen Kesit 1' in sağ alt bölgesinde hız vektörleri elde edilememiştir. Bunun sebebi o bölgede parlama meydana gelmesidir. Oluşan parlama nedeniyle kamera parçacıkların hareketini yakalayamamıştır.

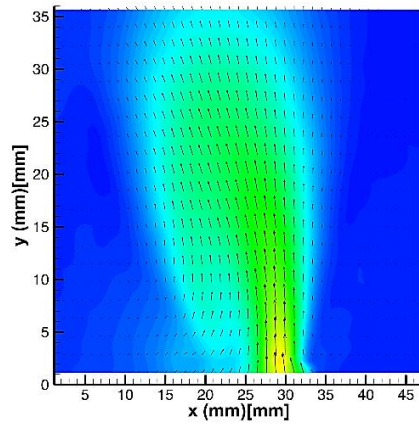




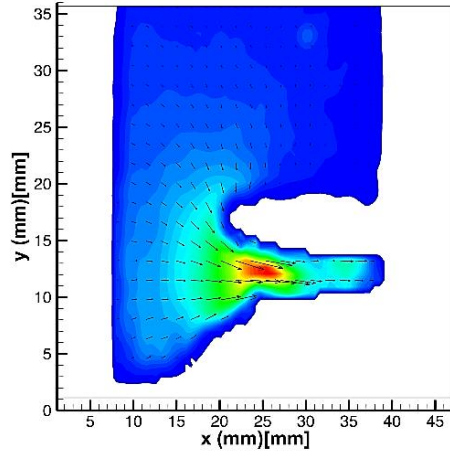
Şekil 5.15 Kesit 1 ortalama hız dağılımları



Şekil 5.16 Kesit 2 ortalama hız dağılımları



Şekil 5.17 Kesit 3 ortalama hız dağılımları



Şekil 5.18 Kesit 4 ortalama hız dağılımları

### SAYISAL MODELLEME

Ön karışimli yanma görülen yakıcılarda (özellikle ev tipi yakıcılar) birincil hava emişi emisyon ve verim değerlerini önemli derecede etkilemektedir. Bu bakımdan birincil hava emişini etkileyen parametreleri incelemek, deneysel olarak belirlenemeyen durumları karşılaştırmak ve uygun bir tasarım elde edebilmek için HAD analiz çalışmaları yapılmıştır. Yapılan HAD analiz çalışmalarında Fluent 16.2 programı kullanılmıştır. [22]

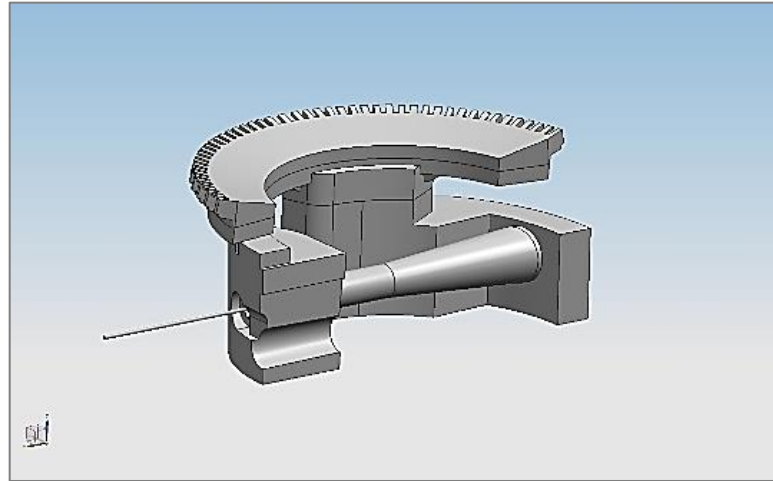
Öncelikle referans olarak seçilen yakıcıya deneysel verilerle model doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Model doğrulama işlemi deneysel olarak yanma durumunda yapılamayacağı için yanma olmadan soğuk akışla yapılmıştır. Uygun model belirlendikten sonra belirlenen parametreler üzerinde parametrik analizler yapılmıştır. Yakıcı modelinin hassas detayları bulunduğu için eleman sayısı da oldukça fazladır. Bu sebeple belirlenen parametrik analiz planına göre her bir durum için yanma analizi yapmak oldukça fazla zaman alacaktır. Zamanı da etkili kullanmak için belirlenen analiz planındaki her bir durum yanma olmadan soğuk akış yapılarak karşılaştırılmıştır. Belirlenen parametrelerde soğuk akış durumunda enjektörden çıkan gaz jeti tarafından sürüklenen birincil hava miktarları karşılaştırılmıştır. Daha sonra referans yakıcı ile parametrik analiz sonuçlarına göre belirlenen uygun boyutlardaki yakıcıya tam yanma analizi yapılmıştır. Yanma durumunda da sürüklenen birincil hava miktarları karşılaştırıldıktan sonra son olarak parametrik analiz sonuçlarına göre belirlenen uygun boyutlardaki yakıcı üretimi sağlanarak deneysel olarak referans yakıcının emisyon ve verim değerleri ile karşılaştırılmıştır.

## 6.1 Referans Yakıcı Modeli

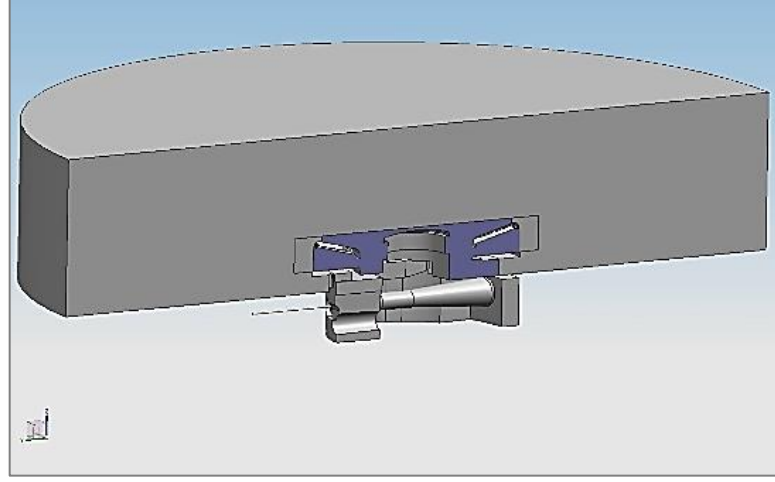
Yapılan öncül çalışmada referans olarak seçilen yakıcıya soğuk akış analizi yapılmıştır. Hacimsel debi ölçümünden deneysel olarak elde edilen hacimsel debi değeri ve PIV sonucu elde edilen hız dağılımlarının karakteristiğini doğrulayarak uygun model oluşturulmuştur.

### 6.1.1 Hacimsel Debi Doğrulama

Referans yakıcı simetrik bir yapıya sahip olduğundan analizlerde yakıcı geometrisi ikiye bölünerek kesit alanı simetri olarak tanımlanmıştır. Ayrıca modelde enjektörden gaz giriş kısmı velocity inlet olarak belirlenmiştir. Enjektör deliği akış hacmi biraz uzatılarak hızın rejime oturması sağlanmıştır. Yanma esnasında hacimsel debinin deneysel olarak belirlenememesi sonucu yanma olmadan soğuk akış olarak portlardan çıkan karışımın debi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Yanma olmadığı için de enjektörden doğalgaz yerine hava gönderilmiştir. Gönderilen havanın hızı hesaplanarak  $U_h$  olarak belirlenmiştir. Bu değer velocity inlet kısmından hız girişi olarak tanımlanmıştır. Modeli doğrulayabilmek için de enjektörden aynı şekilde hava gönderilmiştir. Şekil 6.1' de referans yakıcının akış hacmi gösterilmiştir. Şekil 6.2' de ise ortam havasıyla beraber tam akış hacmi gösterilmiştir.

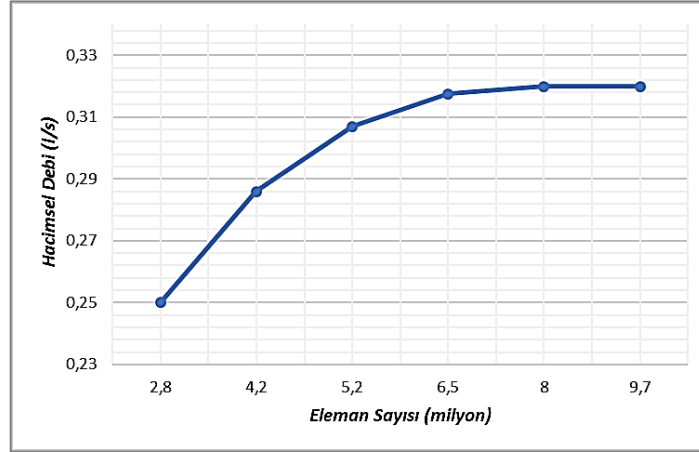


Şekil 6.1 Referans yakıcının akış hacmi



Şekil 6.2 Ortam havasıyla beraber tam akış hacmi

Öncelikle model ağ örgüsünden bağımsız hale getirilmiştir. Enjektör hacmi, birincil hava giriş alanı, ventüri kanalı girişi ve port - pilot bölgeleri hassas olduğu için bu bölgelerdeki eleman sayıları fazla miktarda yapılmıştır. Referans yakıcı üzerindeki ağ örgüsü bağımsızlığının grafiği Şekil 6.3' de gösterilmiştir.

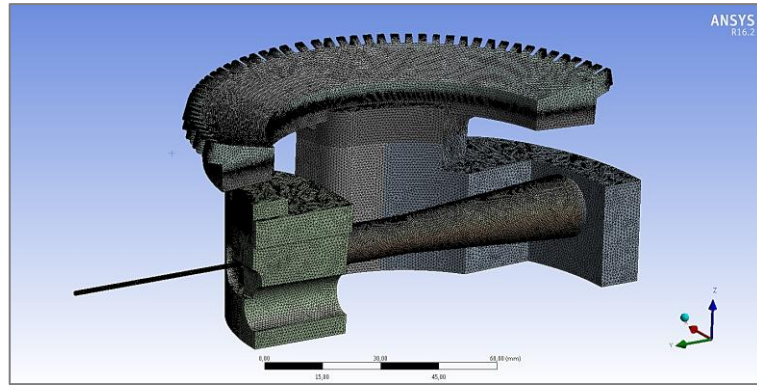


Şekil 6.3 Ağ örgüsü bağımsızlığı

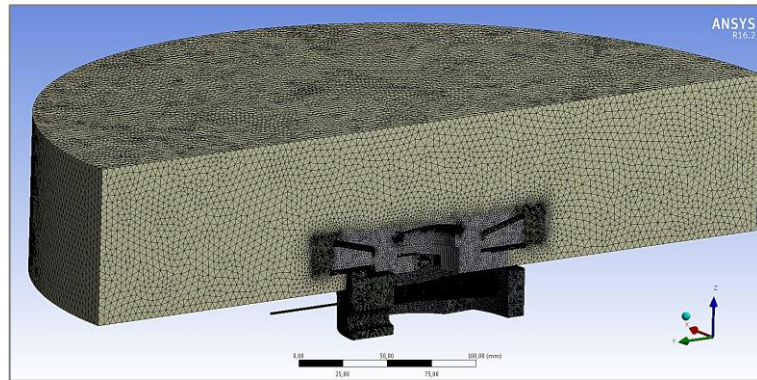
Bu grafikten de görüldüğü gibi yaklaşık 8 milyondan sonra eleman sayısı sonucu değiştirmemektedir. Bu nedenle modelde yaklaşık 8 milyon eleman olmasına karar verilmiştir. Referans yakıcıya uygulanan ağ örgüsü Şekil 6.4' de, tüm akış hacmine uygulanan ağ örgüsü de Şekil 6.5' de gösterilmiştir.

Literatürde bu tarz akış modellerinde kullanılan türbülans modelleri araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu bu tarz modellerde k-epsilon türbülans modelinin daha doğru sonuçlar verdiği görülmüş ve türbülans modeli olarak k-epsilon modeli

kullanılmaya karar verilmiştir. k-epsilon türbülans modelinin türlerinden olan Standart k-epsilon, RNG k-epsilon ve Realizable k-epsilon modellerinden en uygun olanı da deneysel verilerden elde edilen sonuca göre belirlenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre portlardan çıkan karışımın hacimsel debisi Standart k-epsilon modeli kullanıldığında deneysel olarak belirlenen debiye en yakın değer bulunmuştur. Bu sonuçlara göre türbülans modeli olarak Standart k-epsilon modeli kullanılmaya karar verilmiştir. Ancak diğer türbülans modellerinin sonuçları birbirlerine oldukça yakındır. Türbülans modellerinin sonuçları arasındaki maksimum farklılık %4,5 olarak belirlenmiştir.



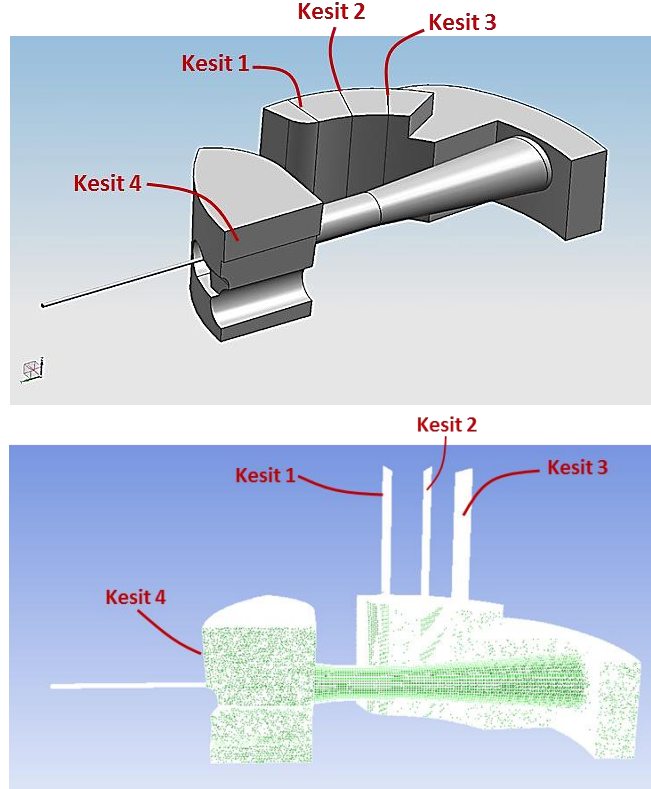
Şekil 6.4 Referans yakıcıya uygulanan ağ örgüsü



Şekil 6.5 Tüm akış hacmine uygulanan ağ örgüsü

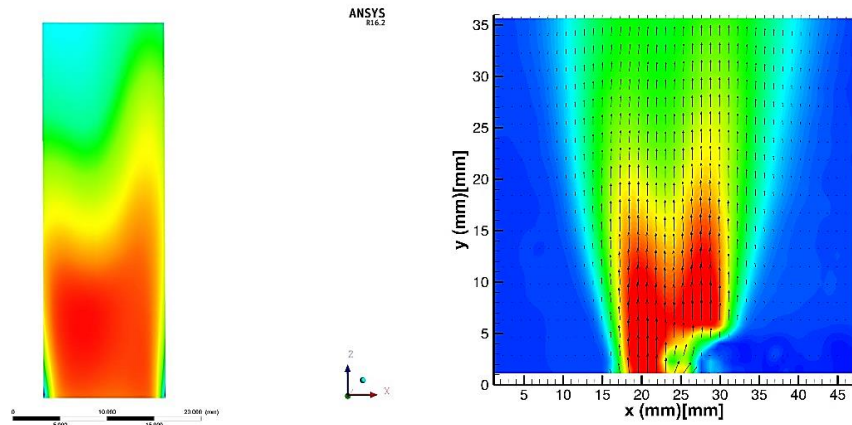
### 6.1.2 PIV Sonucu Hız Dağılımı Doğrulama

Referans yakıcıda karışım odasından çıkan karışımının belli kesitlerdeki hız dağılımlarını belirlemek için PIV sistemi ile deneysel bir çalışma yapılmıştı. HAD analiz modelini doğrulamak amacıyla modelin aynı kesitlerindeki analiz ve deney sonucunda elde edilen hız dağılımları karşılaştırılmıştır. Yakıcı kafası kullanılmadan oluşturulan model ve hız dağılımları incelenen kesitler Şekil 6.6' da gösterilmiştir.



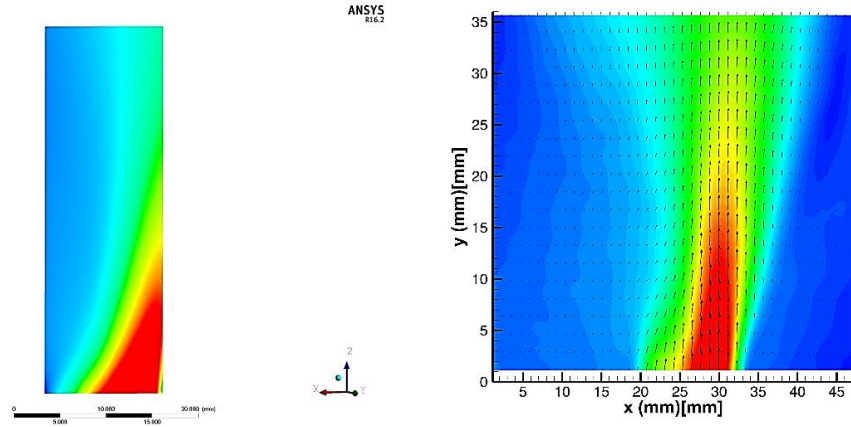
Şekil 6.6 Analiz modeli ve hız dağılımı incelenen kesitler

Deneysel olarak PIV sistemiyle hız dağılımının belirlenmesinde enjektörden hava gönderildiği için yapılan analizde de enjektörden hava gönderilmiştir ve velocity inlet girişinde  $U_h$ ' lik hız değeri tanımlanmıştır. Yakıcı simetrik bir yapıda olduğu için analizde de yakıcının yarısı alınarak kesit yüzeyi simetri olarak tanımlanmıştır. Analiz sonucuna göre belirlenen kesitlerdeki hız dağılımları ile PIV sistemiyle elde edilen hız dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 6.7' den Şekil 6.10' a kadar verilmiştir.

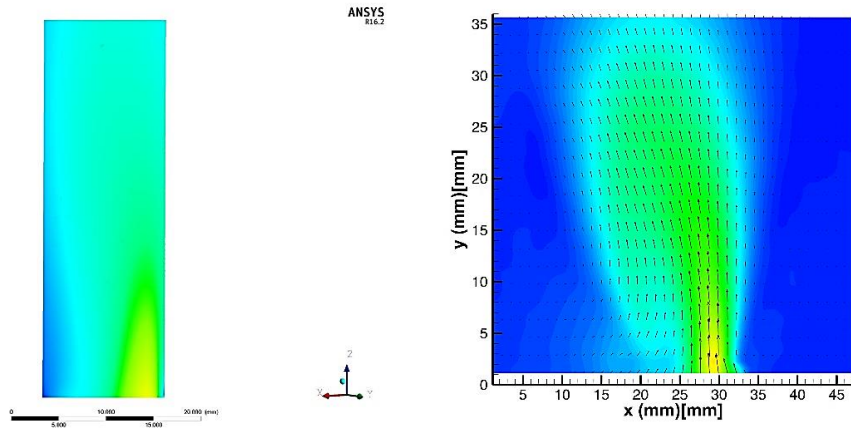


Şekil 6.7 Kesit 1 ortalama hız dağılımları (Analiz sonucu – PIV sonucu)

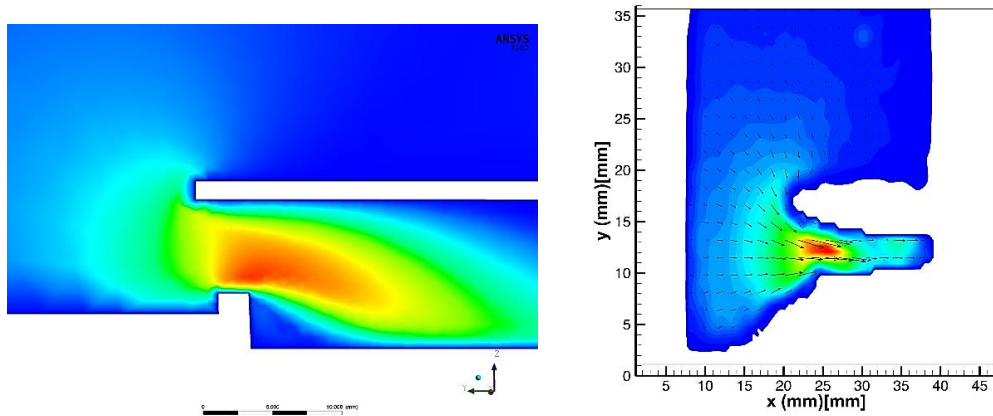




Şekil 6.8 Kesit 2 ortalama hız dağılımları (Analiz sonucu – PIV sonucu)



Şekil 6.9 Kesit 3 ortalama hız dağılımları (Analiz sonucu – PIV sonucu)



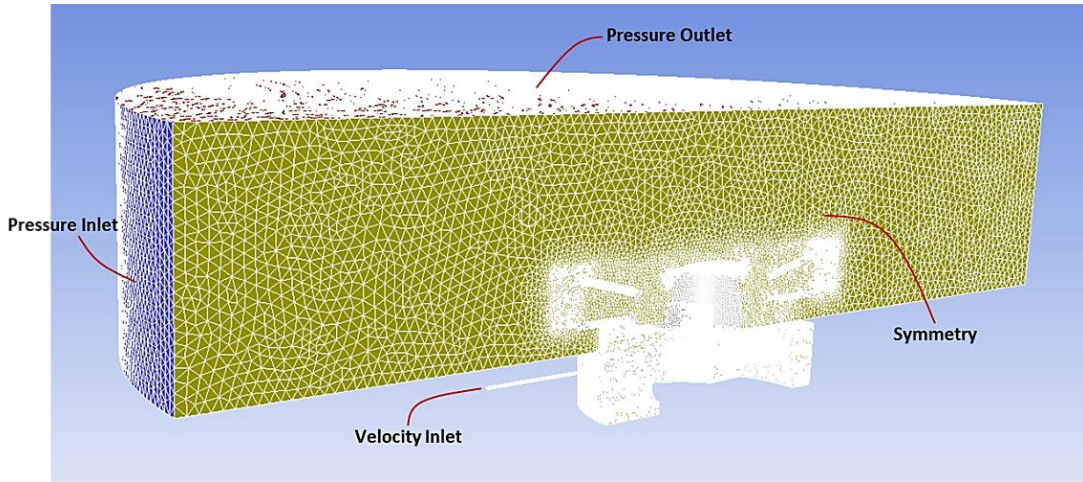
Şekil 6.10 Kesit 4 ortalama hız dağılımları (Analiz sonucu – PIV sonucu)



Standart k-epsilon türbülans modeli ile yapılan bu analizlerin sonuçlarına göre belirlenen hız dağılımlarının karakterleri ile deneysel olarak PIV sistemiyle elde edilen hız dağılımlarının karakterleri birbirine çok benzemektedir. Böylelikle modelin hız dağılım karakteri deneysel olarak doğrulanmıştır.

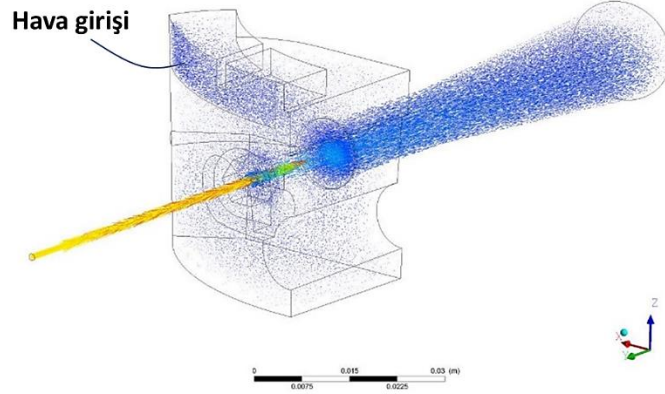
### 6.1.3 Referans Yakıcı Soğuk Akış Analizi

Referans yakıcı üzerinde yapılan öncül soğuk akış analizinde model yaklaşık 8 milyon elemandan oluşmaktadır ve türbülans modeli olarak Standart k-epsilon modeli kullanılmıştır. Doğalgazın içeriğinin büyük bir kısmını metan gazı oluşturmaktadır. Bu sebeple sınır koşulu olarak velocity inlet kısmından metan gazı gönderilmiştir. Gönderilen gazın hızı daha önce hesaplandığı gibi  $U_g$  olarak tanımlanmıştır. Şekil 6.11' de referans yakıcı modelindeki sınır koşulları gösterilmiştir. Ayrıca çözüm yöntemi olarak Pressure velocity-coupling SIMPLE Scheme kullanılmıştır.



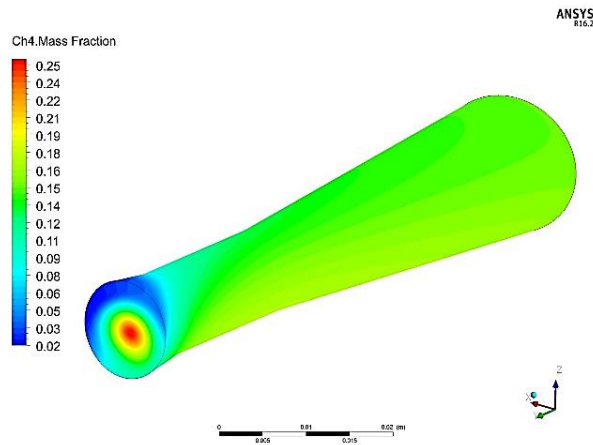
Şekil 6.11 Referans yakıcı modeli sınır koşulları

Yapılan öncül analiz sonucunda enjektörden çıkan gaz ve gazın sürüklediği birincil havanın hız vektörleri Şekil 6.12' de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi enjektörden hızla çıkan gaz ventüri kanalına girmektedir. Bu esnada gaz jetinin etrafında oluşan negatif basınç sayesinde hava giriş kısmından hava girip gaz jetinin etrafından sürüklenmektedir.

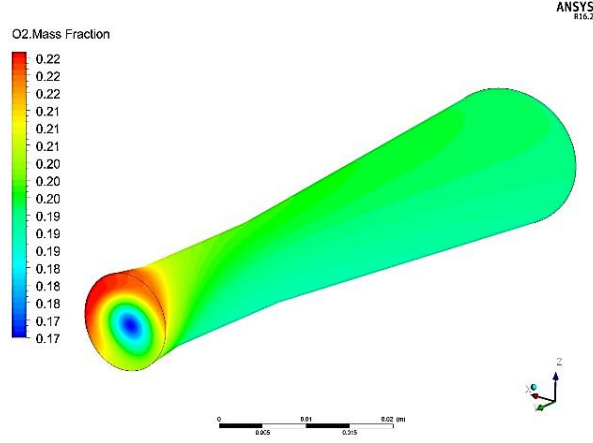


Şekil 6.12 Analiz sonucu referans yakıcıdaki hız vektörleri

Analiz sonucuna göre ventüri kanalındaki  $\text{CH}_4$  kütle oranı ve  $\text{O}_2$  kütle oranı dağılımları sırasıyla Şekil 6.13 ve Şekil 6.14’ de gösterilmiştir. Şekil 6.13’ de görüldüğü gibi ventüri kanalı girişindeki maksimum  $\text{CH}_4$  kütle oranı 0,25 olarak bulunmuştur. Ayrıca Şekil 6.14’ de gösterilen ventüri kanalındaki  $\text{O}_2$  kütle oranı dağılımına göre ventüri girişinin özellikle üst kısımlarında  $\text{O}_2$  oranının fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yakıcının sürüklediği birincil havanın girişinin üst bölgeden olması ile açıklanabilir. Enjektörden çıkan yakıt jeti birincil hava ile buluşup havayı sürükleyerek ventüri kanalının merkezinden girmektedir. Bu nedenle ventüri girişinin merkezindeki  $\text{O}_2$  kütle oranı kenarla kıyasla daha az olmaktadır.



Şekil 6.13 Referans yakıcının ventüri kanalındaki  $\text{CH}_4$  kütle oranı



Şekil 6.14 Referans yakıcının ventüri kanalındaki O<sub>2</sub> kütleli oranı

Enjektörden çıkan gazın hacimsel debisi  $\dot{V}_g$ , gaz jetinin sürüklediği birincil havanın hacimsel debisi  $\dot{V}_a$  olarak simgelenmiştir.  $\dot{V}_a/\dot{V}_g$  oranı da sürüklenme oranı (R) olarak belirtilmiştir. Bu durumda referans yakıcının soğuk akış analizine göre sürüklenme oranı **R=4,12** olarak bulunmuştur.

## 6.2 Parametrik Analizler

Yanma işleminde birincil hava emişi emisyon ve verim değerlerini önemli derecede etkilemektedir. Bu bakımdan birincil hava emişini etkileyen parametreleri incelemek, deneysel olarak belirlenemeyen durumları karşılaştırmak ve uygun bir tasarım elde edebilmek için HAD analiz çalışmaları yapılmıştır. Birincil hava emişini etkileyen 4 farklı parametre belirlenerek parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

### 6.2.1 Parametrelerin Tanımlanması

Literatürden elde edilen bilgilere göre birincil hava emişini etkileyen parametreler şunlardır:

- Yakıt tipi
- Yakıt debisi
- Enjektör geometrisi
- Enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe
- Ventüri kanalı geometrisi
- Karışım odası geometrisi

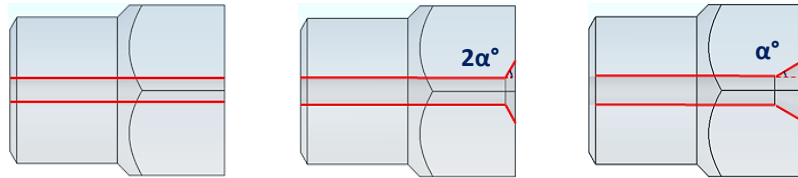
- Yakıcı port geometrisi
- Ortam sıcaklığı

Bu çalışma kapsamında yakıt tipi olarak doğalgaz kullanılmıştır. Yakıt debisi ile port geometrileri sabit tutularak incelenen parametreler şunlardır:

- Enjektör geometrisi
- Enjektör ile ventüri kanalı arasındaki mesafe
- Ventüri kanalının boğaz uzunluğu
- Karışım odasının hacmi

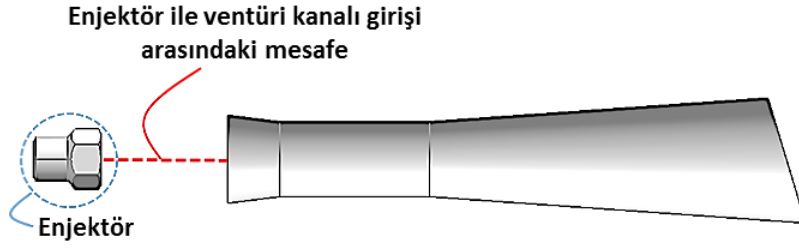
Belirlenen bu parametrelerin birincil hava emişi üzerindeki etkileri Fluent 16.2 programı kullanılarak parametrik analizlerle incelenmiştir. Ayrıca yapılan bu analizler model doğrulamasının yapıldığı gibi yanma olmadan soğuk akışla gerçekleştirilmiştir.

Parametrelerden biri olan enjektör geometrisinde enjektör deliğinin çıkış açısı (havşa durumu) değiştirilmiştir. Enjektör deliğinin çıkış açısı değiştirilirken çapı sabit tutulmuştur. Bu sayede enjektörden geçen debiyi değiştirmeden geometrinin birincil hava emişine etkisi incelenmiştir. Açılı olarak Şekil 6.15’ de gösterilen  $0^\circ$  (düz-havşasız enjektör) ile  $2\alpha^\circ$  arası çıkış açılına sahip enjektörler ele alınmıştır.



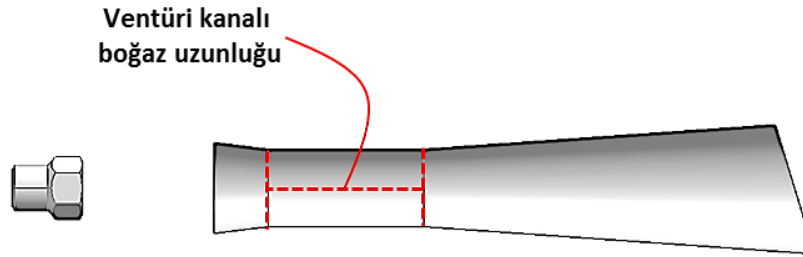
Şekil 6.15 Enjektör geometrileri

Bir diğer parametre olarak Şekil 6.16’ da gösterilen enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe seçilmiştir. Bu parametrede de  $0,82a$  ile  $1,18a$  arası mesafeler incelenmiştir.



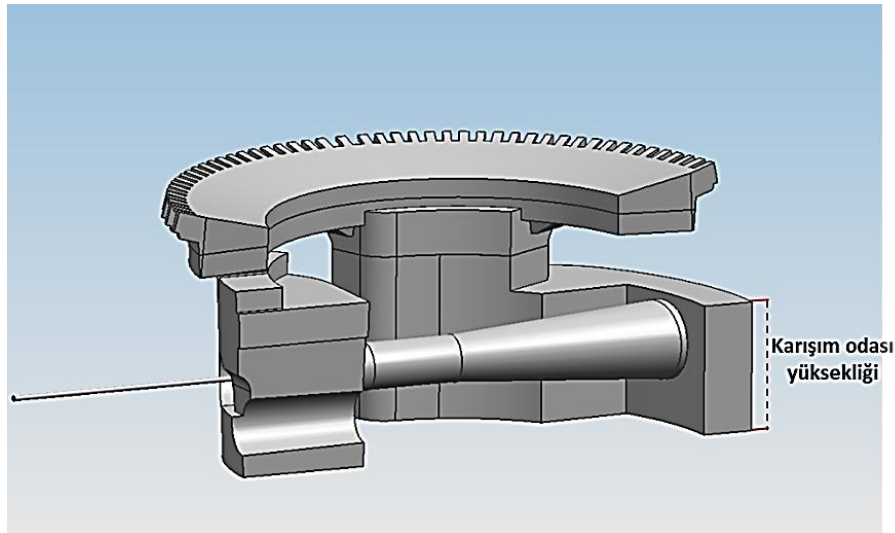
Şekil 6.16 Enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki

Ventüri kanalının boğaz uzunluğu olarak da 0 ile 2L arası uzunluklar ele alınmıştır.



Şekil 6.17 Ventüri kanalı boğaz uzunluğu

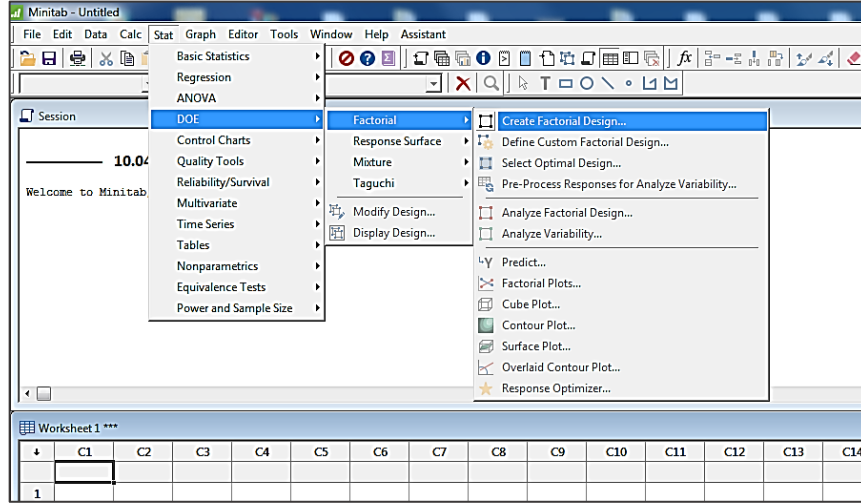
Son olarak incelenen parametre de karışım odasının hacmidir. Karışım odasının hacminin incelenmesi odanın yüksekliği değiştirilerek sağlanmıştır. 0,85H ile 1,15H arası oda yükseklikleri ele alınarak birincil havaya etkileri incelenmiştir.



Şekil 6.18 Karışım odası yüksekliği

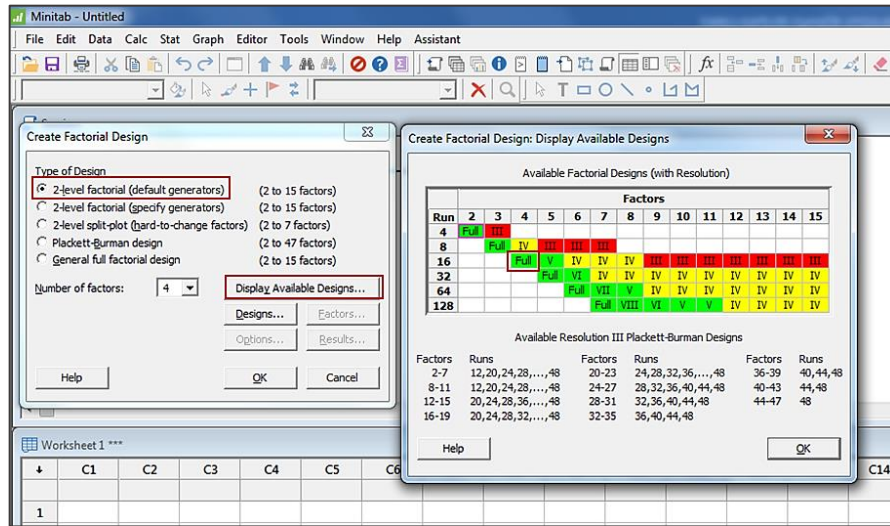
## 6.2.2 Analiz Planının Oluşturulması

Belirlenen parametreler dikkate alınarak MINITAB 17 istatistiksel veri analizi yazılımından DOE (Design of Experiments) başlığı altında faktöriyel tasarım metodu ile analiz planı oluşturulmuştur. [23]



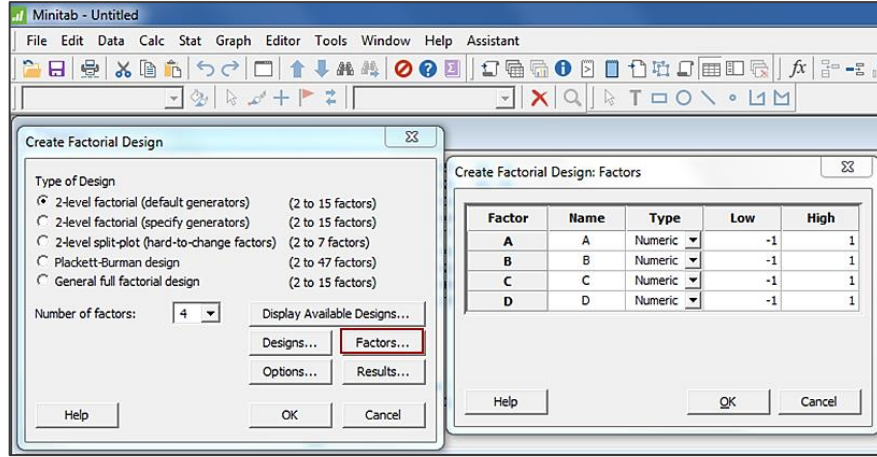
Şekil 6.19 Minitab üzerinden faktöriyel tasarımın seçilmesi

Ardından, analiz planını belirlemek için faktör sayısı 4 olarak seçilmiştir ve tam faktöriyel yapılp ( $2^4=16$ ) ayrıca orta nokta da alınarak toplam 17 analiz belirlenmiştir.



Şekil 6.20 Analiz planının belirlenmesi

Analiz planının belirlenmesinin ardından Şekil 6.21' de gösterildiği gibi faktörler tanımlanmıştır.



Şekil 6.21 Analiz planında faktörlerin oluşturulması

Girdilere göre Minitab` in oluşturduğu analiz planı Çizelge 6.1` de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Parametrik analiz planı

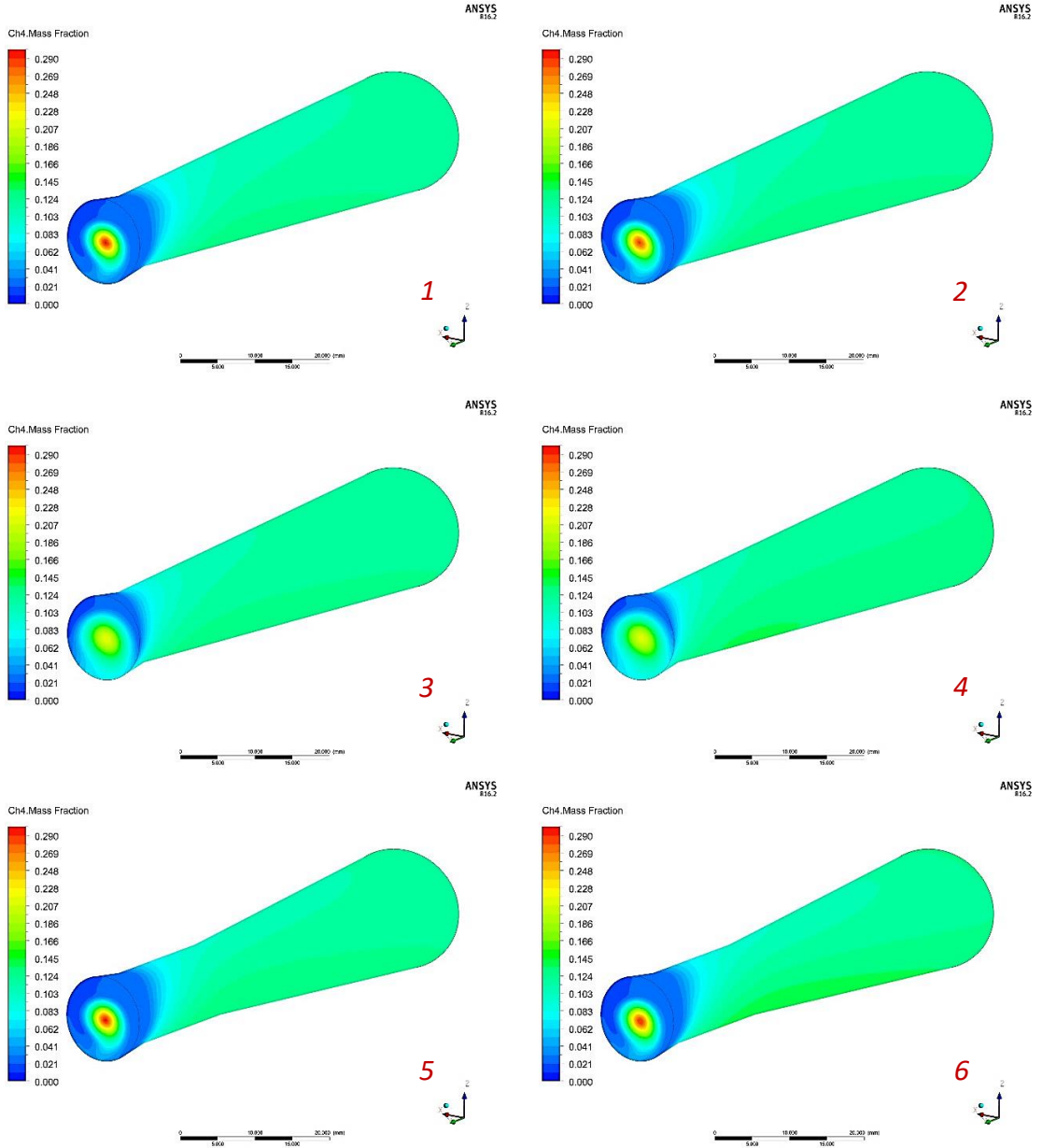
	<i>Enjektör çıkış açısı (°)</i>	<i>Enjektör – Ventüri arası mesafe</i>	<i>Ventüri kanalı boğaz uzunluğu</i>	<i>Karışım odası yüksekliği</i>
<b>1</b>	0	0,82a	0	0,85H
<b>2</b>	2α	0,82a	0	0,85H
<b>3</b>	0	1,18a	0	0,85H
<b>4</b>	2α	1,18a	0	0,85H
<b>5</b>	0	0,82a	2L	0,85H
<b>6</b>	2α	0,82a	2L	0,85H
<b>7</b>	0	1,18a	2L	0,85H
<b>8</b>	2α	1,18a	2L	0,85H
<b>9</b>	0	0,82a	0	1,15H
<b>10</b>	2α	0,82a	0	1,15H
<b>11</b>	0	1,18a	0	1,15H
<b>12</b>	2α	1,18a	0	1,15H
<b>13</b>	0	0,82a	2L	1,15H
<b>14</b>	2α	0,82a	2L	1,15H



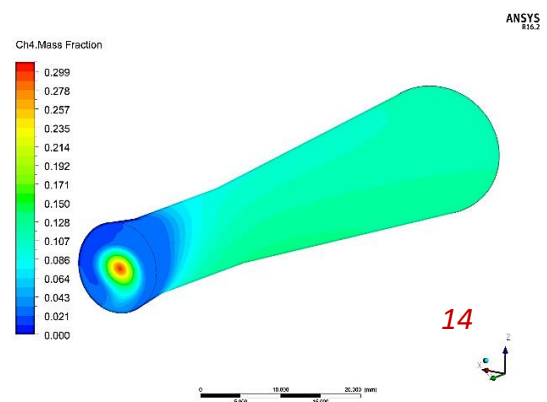
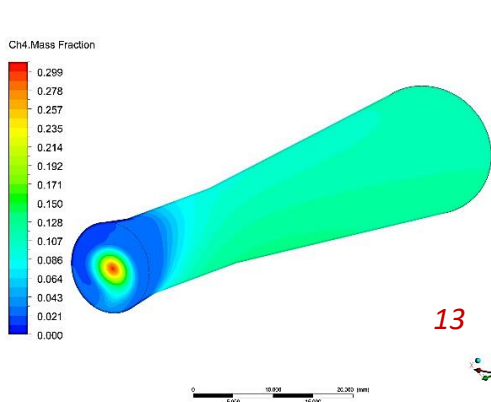
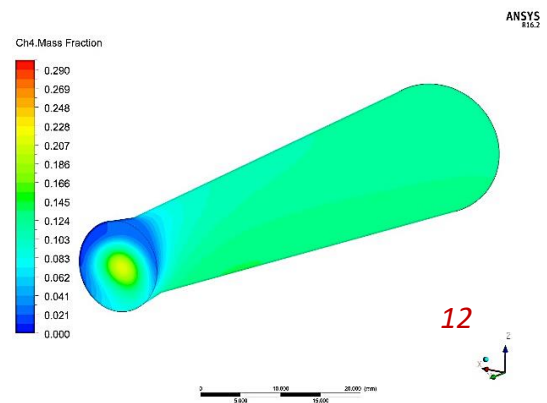
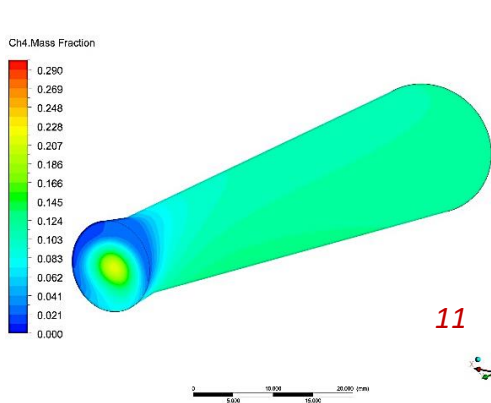
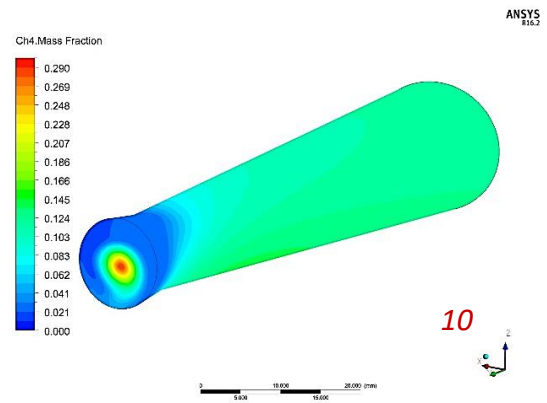
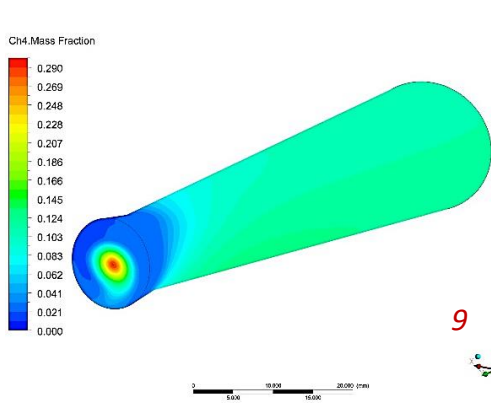
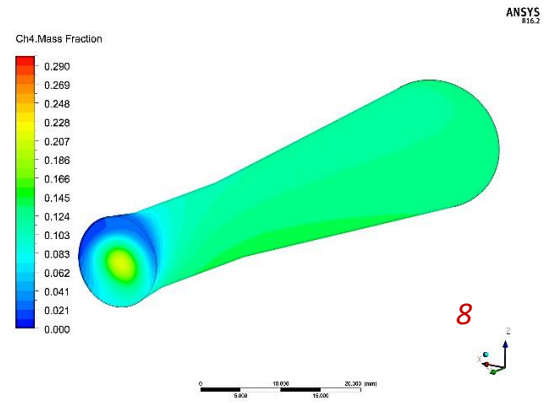
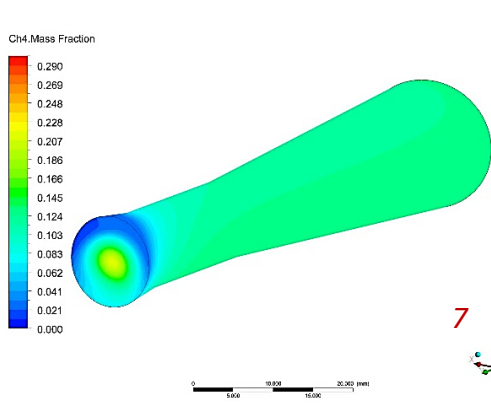
15	0	1,18a	2L	1,15H
16	2 $\alpha$	1,18a	2L	1,15H
17	$\alpha$	a	L	H

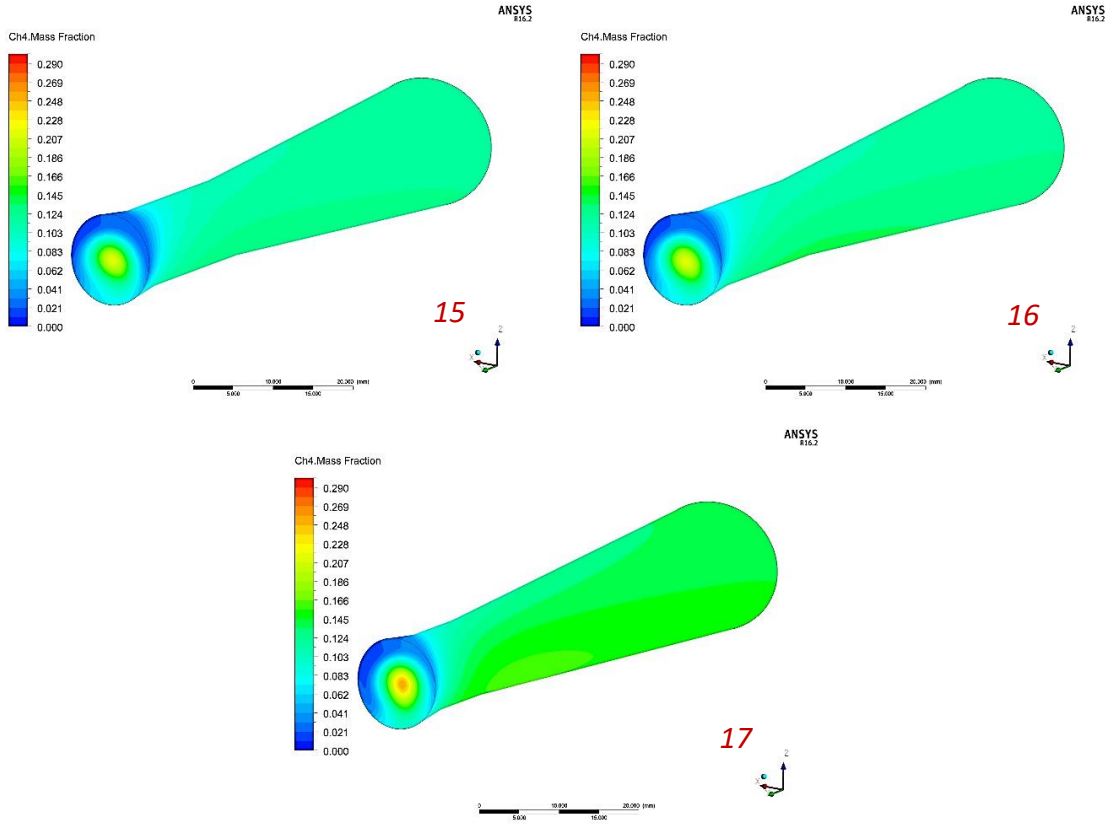
### 6.2.3 Parametrik Analiz Sonuçları

Birincil hava emişini etkileyen dört farklı parametre üzerinde yapılan parametrik analiz sonuçları Şekil 6.22 ve Şekil 6.23' de gösterilmiştir. Analizi yapılan parametrik modellerin ventürü kanallarındaki kütlelesel CH<sub>4</sub> ve kütlelesel O<sub>2</sub> dağılımı sırasıyla Şekil 6.22 ve Şekil 6.23' de gösterilmektedir.





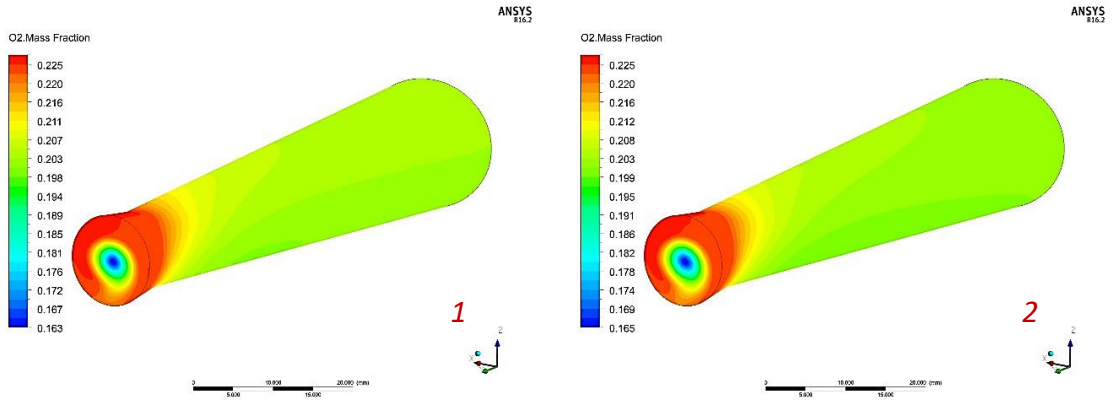


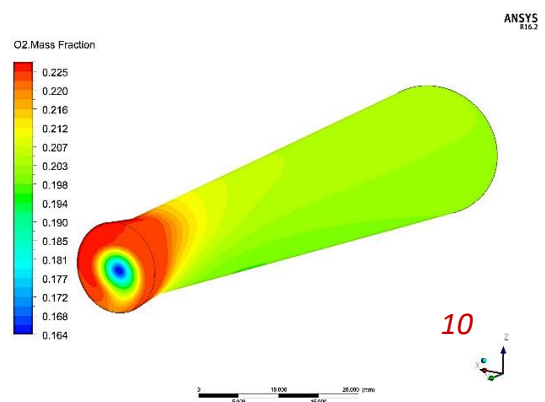
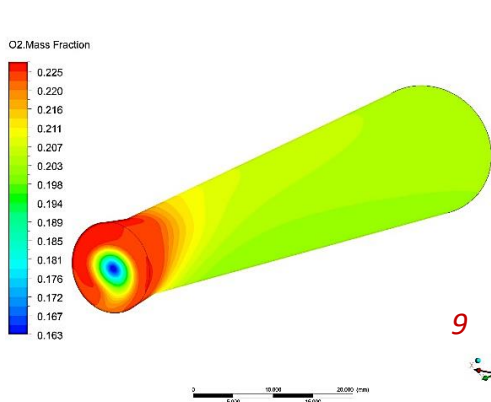
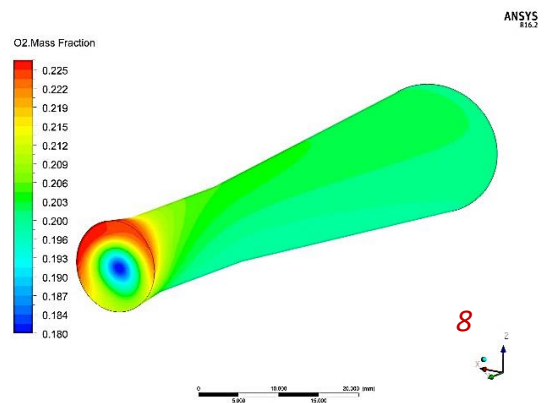
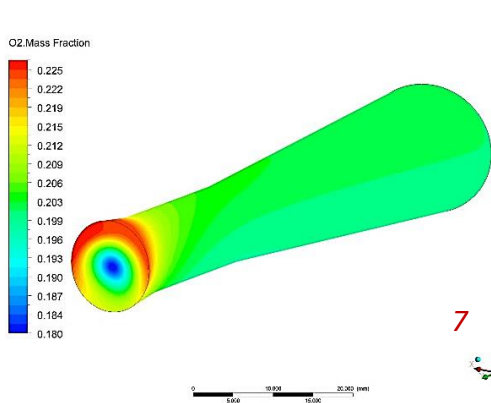
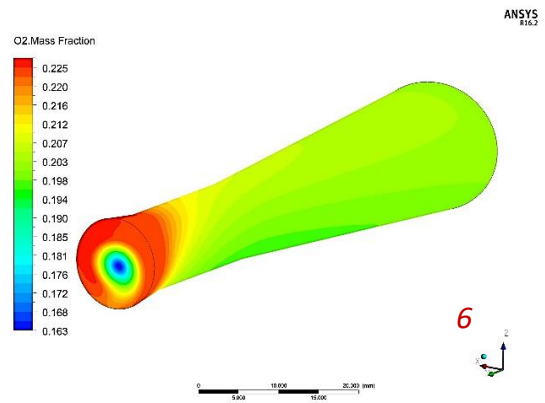
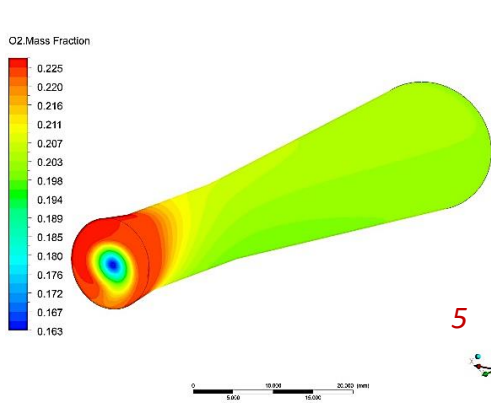
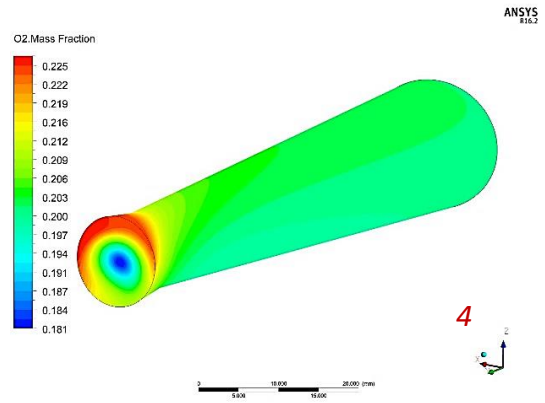
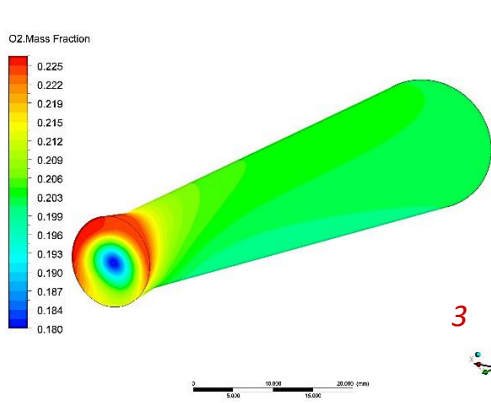


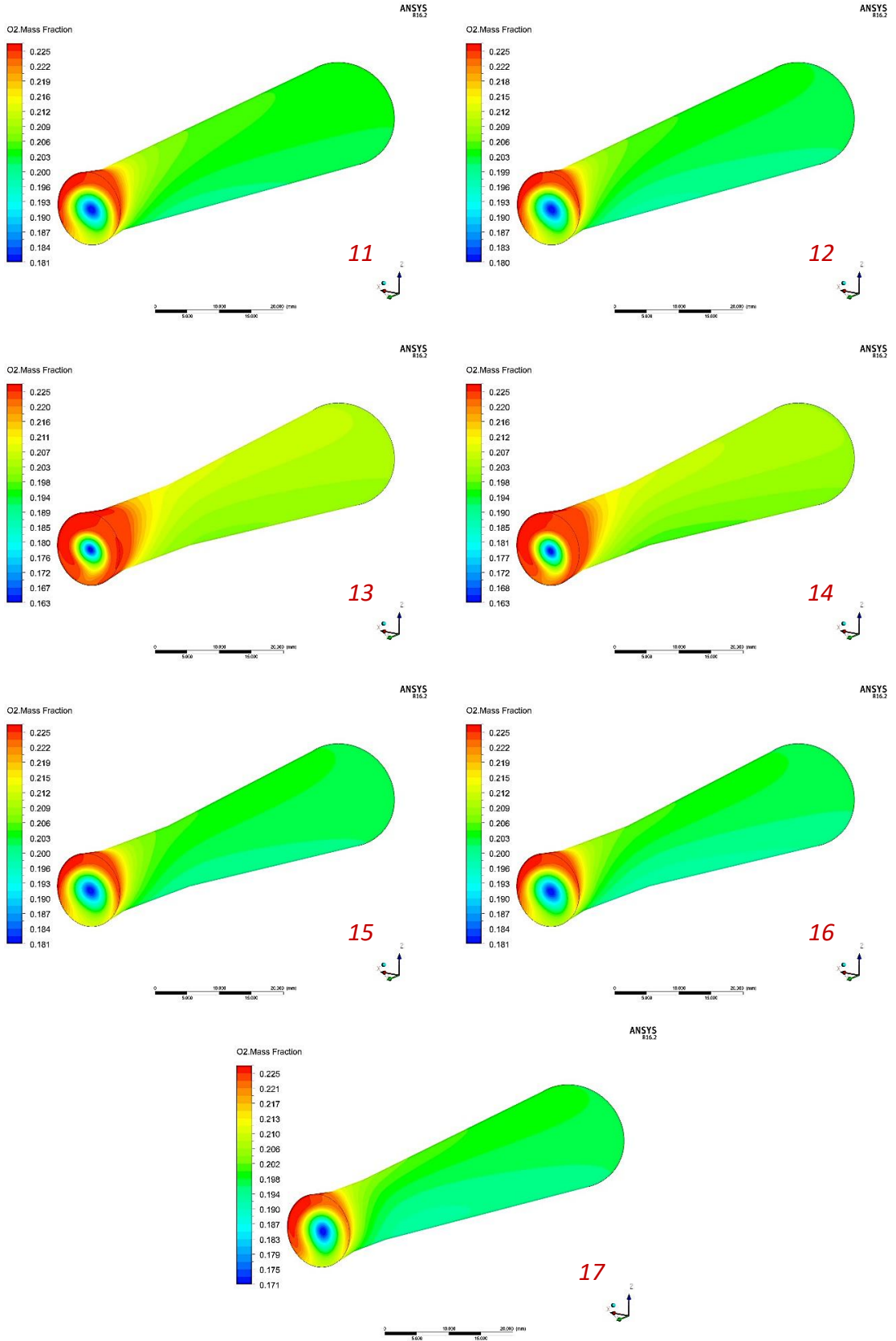
Şekil 6.22 Parametrik modellerin ventürü kanallarındaki kütleli CH<sub>4</sub> dağılımı

Şekil 6.22' de kütleli CH<sub>4</sub> dağılımını gösteren görsellerin kütleli renk skalaları eşittir. Modeller arasında karşılaştırmanın yapılabilmesi için tüm görsellerde CH<sub>4</sub> kütle oranları 0 ile 0,3 arasındaki renk skalasında bulunmaktadır.

Ayrıca Şekil 6.23' de kütleli O<sub>2</sub> dağılımını gösteren görsellerin de kütleli renk skalaları eşittir. Modeller arasında karşılaştırmanın yapılabilmesi için tüm görsellerde O<sub>2</sub> kütle oranları 0 ile 0,23 arasındaki renk skalasında bulunmaktadır.







Şekil 6.23 Parametrik modellerin ventüri kanallarındaki kütleli O<sub>2</sub> dağılımı

Enjektörden çıkan gaz jetinin sürüklediği birincil havanın hacimsel debisi  $\dot{V}_a$ , enjektörden çıkan gazın hacimsel debisi ise  $\dot{V}_g$  olarak ifade edilmektedir. Ayrıca gaz jetinin sürüklediği birincil havanın hacimsel debisi gaz jetinin hacimsel debisine ( $\dot{V}_a/\dot{V}_g$ ) oranlandığı durumda sürüklenme oranı ( $R$ ) bulunmaktadır. Yapılan parametrik analiz sonuçlarına göre modellerin sürüklenme oranları Çizelge 6.2’ de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Farklı geometrilere yapılan analizlere göre sürüklenme oranları

	<i>Enjektör çıkış açısı (°)</i>	<i>Enjektör – Ventüri kanalı arası mesafe</i>	<i>Ventüri kanalı boğaz uzunluğu</i>	<i>Karışım odası yüksekliği</i>	<i>Sürüklenme oranı (R)</i>
<b>1</b>	0	0,82a	0	0,85H	5,41
<b>2</b>	2α	0,82a	0	0,85H	5,3
<b>3</b>	0	1,18a	0	0,85H	5,25
<b>4</b>	2α	1,18a	0	0,85H	5,08
<b>5</b>	0	0,82a	2L	0,85H	5,33
<b>6</b>	2α	0,82a	2L	0,85H	5,16
<b>7</b>	0	1,18a	2L	0,85H	5,04
<b>8</b>	2α	1,18a	2L	0,85H	4,96
<b>9</b>	0	0,82a	0	1,15H	5,6
<b>10</b>	2α	0,82a	0	1,15H	5,31
<b>11</b>	0	1,18a	0	1,15H	5,48
<b>12</b>	2α	1,18a	0	1,15H	5,25
<b>13</b>	0	0,82a	2L	1,15H	5,59
<b>14</b>	2α	0,82a	2L	1,15H	5,25
<b>15</b>	0	1,18a	2L	1,15H	5,27
<b>16</b>	2α	1,18a	2L	1,15H	5,13
<b>17</b>	α	a	L	H	4,45

Yapılan parametrik analiz sonuçlarına göre en fazla birincil havanın sürüklendiği yakıcı 9 numara ile gösterilen boyutlara sahip yakıcı olduğu görülmüştür. Buna göre enjektör düz – havşasız olmalıdır. Ayrıca enjektör – ventüri kanalı arası mesafa 0,82a, ventüri kanalı uzunluğu 0 ve karışım odası yüksekliği 1,15H olduğu durumda soğuk akışta sürüklenme oranı 5,6 olmaktadır.

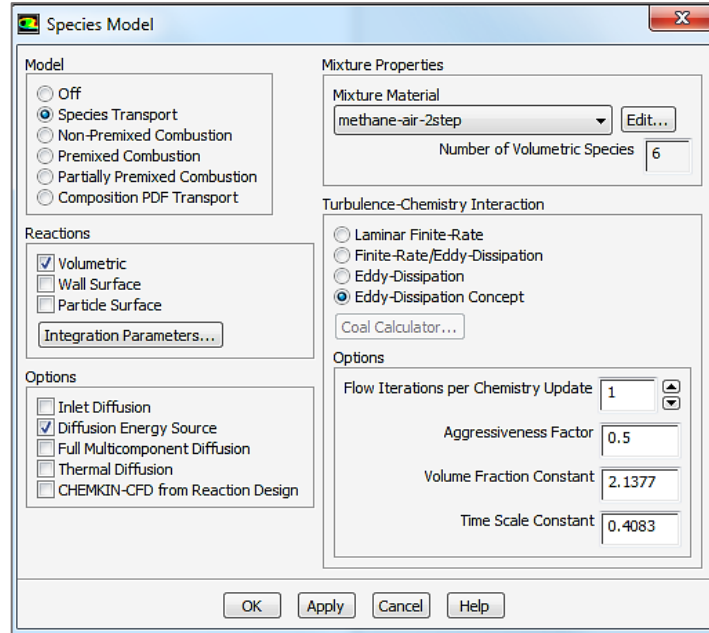
### 6.3 Yanma Analizi

Parametrik soğuk akış analizleri tamamlandıktan sonra referans yakıcı ile parametrik analiz sonuçlarına göre en uygun birincil hava sürüklenmesini gerçekleştiren 9 numaralı yakıcıya tam yanma analizi yapılarak yanma durumundaki birincil hava sürüklenmeleri karşılaştırılmıştır.

Fluent programında mevcut bulunan yanma modelleri;

- Species Transport
- Non-Premix Combustion
- Premixed Combustion
- Partially Premixed Combustion
- Composition PDF Transport

olarak 5 gruba ayrılmaktadır.

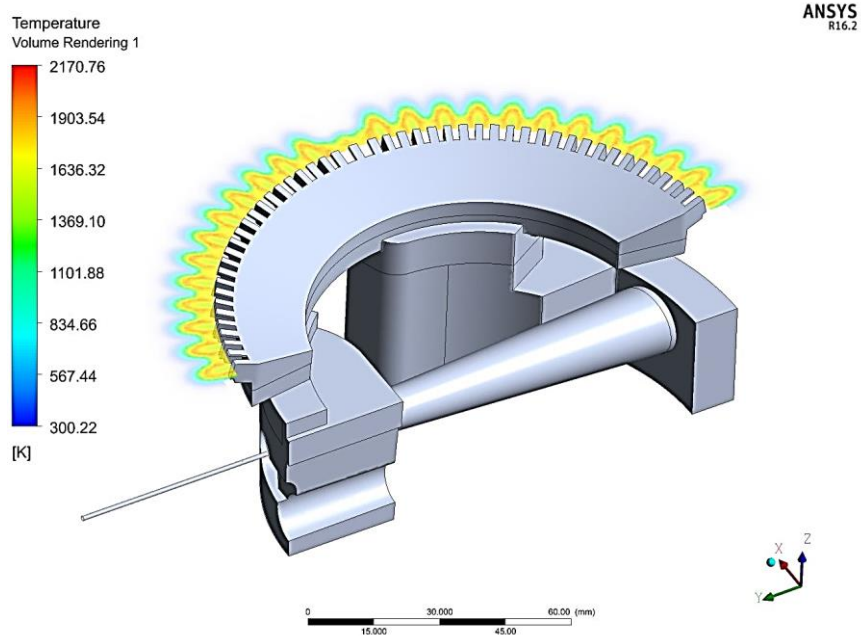


Şekil 6.24 Fluent programında yanma analizi için kullanılan modeller

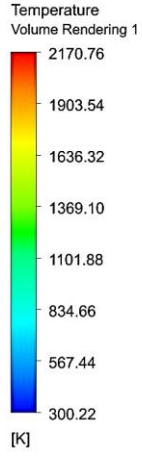
Bu tezde yapılan yanma analizlerinde hem birden fazla tür olduğundan hem de yapılan literatür araştırmasına göre bu tür analizlere daha uygun olan “Species Transport” modeli kullanılmıştır. Yanma işleminin hacimsel olarak gerçekleşmesi için de reaksiyon “Volumetric” seçilmiştir. Ayrıca yakıt olarak metan kullanılmakta ve karışım özelliği “methane-air-2step” seçilerek 2 basamaklı yanma gerçekleştirilmektedir.

Öncelikle enjektörden gönderilen gaz için Şekil 6.11’ de gösterilen velocity inlet kısmında CH<sub>4</sub> kütle oranı 1 seçilmiş ve böylelikle sadece metan gazı gönderilmiştir. Ayrıca yine velocity inlet kısmından  $U_g$ ’ lık hız tanımlanarak metanın enjektördeki hızı belirlenmiştir. Başlangıçta enerji açmadan sadece akış çözdürülmüştür. Bu esnada port çıkışlarındaki ortalama CH<sub>4</sub> kütle oranı kontrol edilmektedir. Port çıkışlarındaki ortalama CH<sub>4</sub> kütle oranı %5’ i geçtiği zaman analiz durdurularak port çıkışlarının etrafındaki hacimde %4 ile %6 arasında CH<sub>4</sub> kütle oranına sahip elemanlar işaretlenmiştir. İşaretlenen bu elemanlara 1300 K gibi yüksek bir sıcaklık verilerek enerji açılmış ve analize devam edilmiştir. Böylelikle portlardan sonra gazın tutuşması sağlanmıştır.

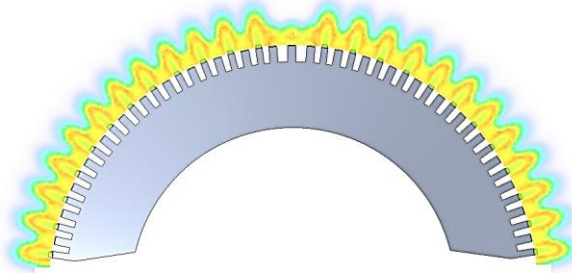
Parametrik analiz planında 9 numara ile gösterilen yakıcıya yapılan yanma analizi sonucu meydana gelen sıcaklıklar Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.25 Belirlenen yakıcıda yanma analizi sonucu meydana gelen sıcaklıklar



ANSYS  
R16.2



Şekil 6.26 Belirlenen yakıcıda yanma analizi sonucu meydana gelen sıcaklıklar

Şekillerde de gösterildiği gibi yanma sonucu oluşan en yüksek sıcaklık değeri yaklaşık 2170 K olmaktadır. Ayrıca yanma analizi sonucuna göre sürüklenme oranı (R) 1,93 olarak hesaplanmıştır. Referans yakıcıya yapılan yanma analizi sonucuna göre de referans yakıcının sürüklenme oranı 1,22 olarak bulunmuştur.



**SONUÇ VE ÖNERİLER**

Oluşturulan analiz planına göre birincil hava emişini etkileyen parametrelerden enjektör çıkış açısı, enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe, ventüri kanalı boğaz uzunluğu ve karışım odasının yüksekliği üzerinde Fluent programı kullanılarak parametrik soğuk akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre parametrelerin incelenmesinde MINITAB 17 istatistiksel veri analizi yazılımı kullanılmıştır.

**Regression Analysis: R versus aci; mesafe; cap; yukseklik**

## Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	5,5288	0,0433	127,64	0,000	
aci	0,022000	0,000839	26,21	0,001	1623,12
mesafe	-0,04762	0,00251	-18,98	0,003	145,06
cap	-0,02586	0,00252	-10,27	0,009	1623,12
yukseklık	0,01262	0,00178	7,09	0,019	99,33
aci*mesafe	-0,001095	0,000049	-22,53	0,002	1672,14
aci*cap	-0,000328	0,000012	-27,34	0,001	99,33
aci*yukseklık	-0,001056	0,000034	-30,82	0,001	1623,12
mesafe*cap	0,000768	0,000146	5,26	0,034	1672,14
mesafe*yukseklık	0,001012	0,000103	9,81	0,010	240,39
cap*yukseklık	0,001786	0,000103	17,38	0,003	1623,12
aci*mesafe*cap	0,000020	0,000001	29,00	0,001	100,33
aci*mesafe*yukseklık	0,000046	0,000002	23,00	0,002	1670,14
mesafe*cap*yukseklık	-0,000089	0,000006	-15,00	0,004	1670,14

## Model Summary

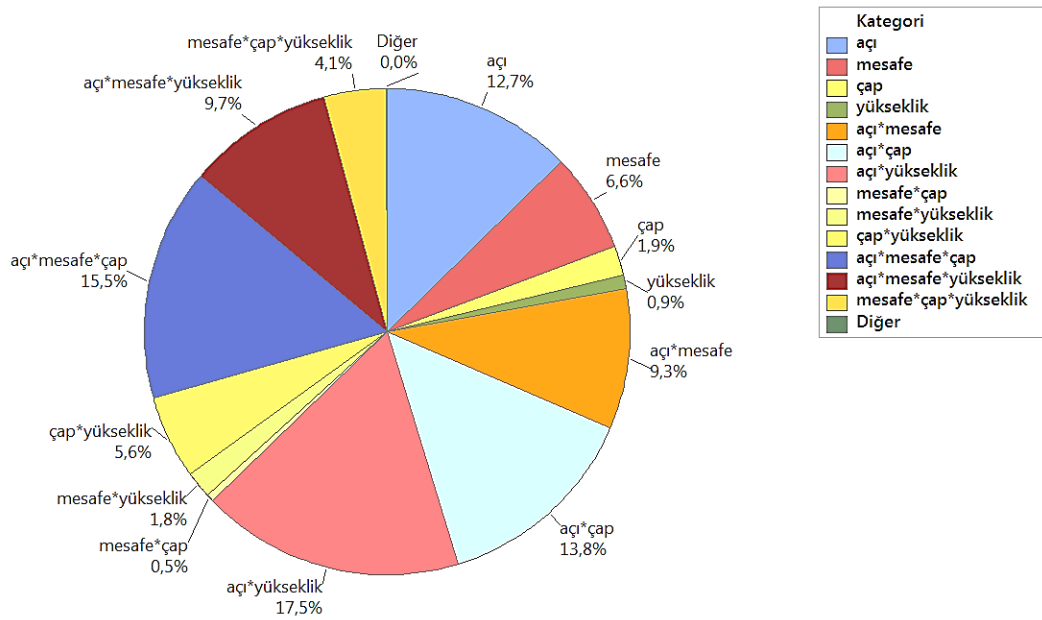
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0025	100,00%	99,98%	99,84%

Şekil 7.1 Sürüklenme oranı üzerine etki eden parametrelerin analiz sonuçları

İstatistiksel yöntemlerle yapılan çalışmada, sürüklenme oranını (R) etki eden parametrelerin analiz sonuçları Şekil 7.1' de verilmiştir.

Şekil 7.1' de gösterilen P-Value değeri analiz sonuçlarına göre oluşturulan korelasyon için o ifadenin anlamlılık derecesini göstermektedir. P-Value değeri 0' dan uzaklaşarak 1' e yaklaştıkça korelasyon için anlamlılık seviyesi azalmaktadır. Bu çalışmada risk %5 olarak belirlenmiş ve P-Value değerinin 0,05' den küçük olduğu ifadeler korelasyon için anlamlı kabul edilmiştir. Etkili olmayan parametreler sadeleştirilerek Şekil 7.1' deki durum elde edilmiştir. Elde edilen bu duruma göre R-sq (adj) değerinden görüldüğü gibi sürüklenme oranı üzerinde etkili parametrelerin %99,98' ini açıklayan bir model oluşturulmuştur.

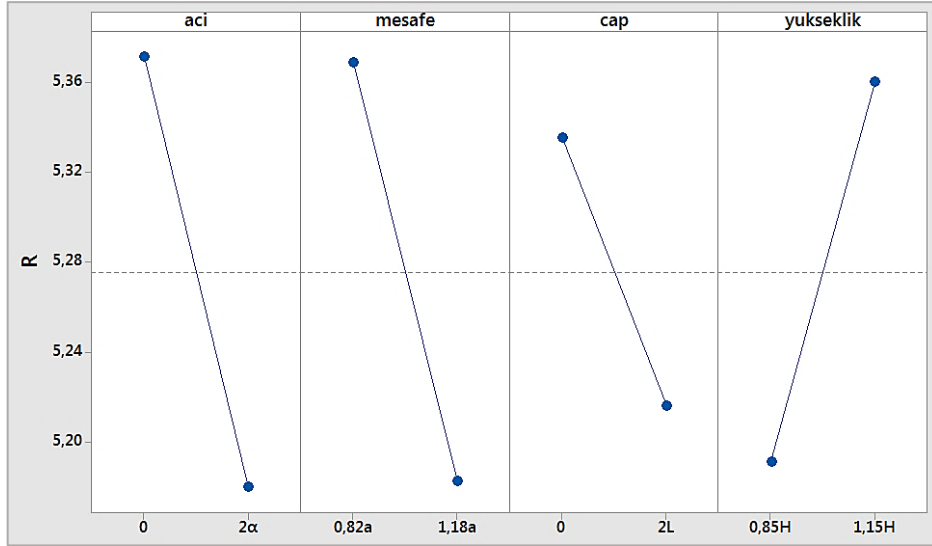
İncelenen parametrelerin sürüklenme oranı üzerindeki tekil ve bileşik etkilerinin dağılımı Şekil 7.2' de gösterilmiştir.



Şekil 7.2 İncelenen parametrelerin sürüklenme oranı üzerindeki etkileri

Şekil 7.2' deki grafiğe göre enjektör çıkış açısının sürüklenme oranı üzerindeki tekil etkisi %12,7 olarak belirlenmiştir. Enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafenin tekil etkisi %6,6 hesaplanırken ventüri boğaz uzunluğunun tekil etkisi %1,9 ve karışım odası yüksekliğinin tekil etkisi %0,9 olarak elde edilmiştir. Ayrıca grafiğe göre sürüklenme oranı üzerindeki en etkili ifade enjektör çıkış açısı ile karışım odası yüksekliğinin bileşik etkisi olarak belirlenmiştir.

Sürüklenme oranlarına göre elde edilen ana etki grafiği incelenen parametrelerin tekil etkilerini birbirleriyle karşılaştırmak için Şekil 7.3' de verilmiştir.



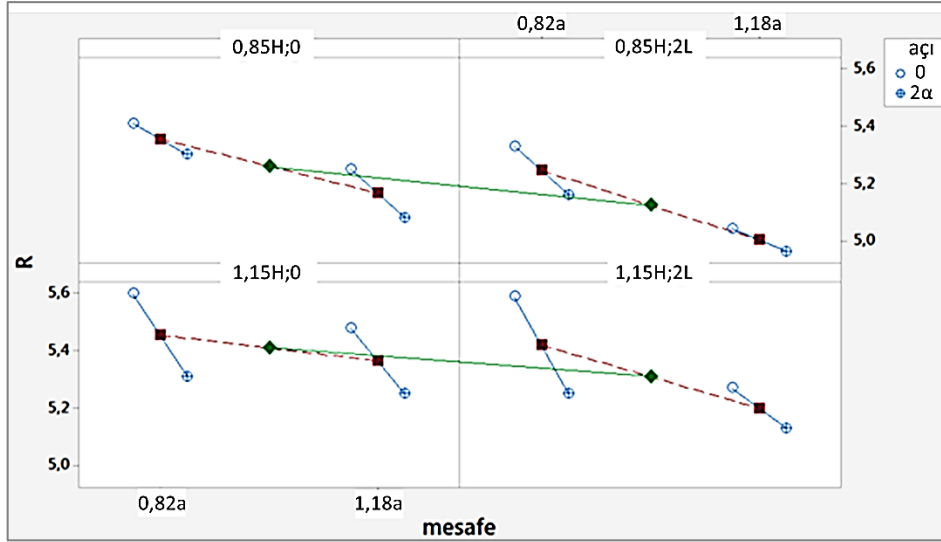
Şekil 7.3 İncelenen parametrelerin ana etki grafiği

Grafiğin yatay eksenini incelenen parametreleri, dikey eksenini ise sürüklenme oranını göstermektedir. İncelenen parametreler sırasıyla;

1. Enjektör çıkış açısı,
2. Enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe,
3. Ventüri boğaz uzunluğu,
4. Karışım odasının yüksekliğidir.

Bu grafiğe göre enjektör çıkış açısı  $0^\circ$  den  $2\alpha^\circ$  ye getirilirse sürüklenme oranı azalmaktadır. Aynı şekilde enjektör ile ventüri kanalı arasındaki mesafenin artırılması ve ventüri boğaz uzunluğunun artırılması sürüklenme oranını azaltıcı yönde etki etmektedir. Ayrıca karışım odasının yüksekliğinin  $0,85H'$  dan  $1,15H'$  a çıkarılması sürüklenme oranını artırmaktadır.

Şekil 7.4' de parametrelerin çoklu değişken grafiği gösterilmiştir. Bu grafikte ana dikey eksen sürüklenme oranını, ana yatay eksen de enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafeyi göstermektedir. Grafikte birbiriyle bağlantılı 4 panel bulunmakta ve bu panellerde içi boş çember  $0^\circ$  çıkış açısına sahip düz enjektörü, içinde "+" sembolü olan çember  $2\alpha^\circ$  çıkış açısına sahip enjektörü ifade etmektedir. Panellerdeki değişkenler ise karışım odası yüksekliği ve ventüri boğaz uzunluğudur.



Şekil 7.4 Çoklu değişken grafiği

Şekil 7.4'de görüldüğü gibi enjektör çıkış açısı  $0^\circ$ , enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe  $0,82a$ , ventüri boğaz uzunluğu  $0$  ve karışım odası yüksekliği  $1,15H$  olduğu durumda en fazla birincil hava sürüklenmektedir. En düşük birincil hava sürüklenmesi ise enjektör çıkış açısının  $2\alpha^\circ$ , enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafenin  $1,18a$ , ventüri boğaz uzunluğunun  $2L$  ve karışım odası yüksekliğinin  $0,85H$  olduğu durumda olmaktadır.

Yapılan tez çalışması kapsamında enjektör çıkış açısı, enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe, ventüri boğaz uzunluğu ve karışım odası yüksekliğinin dolayısı ile hacminin gaz jeti tarafından sürüklenen birincil hava üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmasının çıktıları olarak elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- İncelenen parametreler arasında sürüklenme oranına en çok etki eden parametrenin enjektör çıkış açısı olduğu belirlenmiştir. Enjektör çıkış açısından sonra en etkili parametrenin enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe olduğu görülmüştür. Etki sırasına göre daha sonraki parametre ise ventüri boğaz uzunluğudur. Analiz sonuçlarına göre sürüklenme oranını en az etkileyen parametre karışım odası yüksekliğidir.
- Enjektör çıkış açısı azaldıkça sürüklenme oranı artmaktadır.  $0^\circ$  çıkış açısına sahip düz enjektör en fazla birincil havayı sürüklemektedir.  $0^\circ$  çıkış açısına sahip düz enjektörde enjektör çıkışından itibaren ventüri kanalına kadar gaz jeti daha az

açılarak (merkeze daha yakın) daha hızlı ilerlemektedir. Bu enjektör tipinde gaz jeti diğer modellere göre hızını daha fazla koruyarak ventüri kanalına girdiği için momentum etkisi de daha fazla olmaktadır. Böylece daha fazla birincil hava sürüklemektedir.

- Enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe azaldıkça (seçilen değerler arasında) sürüklenme oranı artmaktadır. Enjektör ventüri kanalına yaklaştıkça enjektörden çıkan gaz jetinin ventüri kanalı girişi kesit alanında etki ettiği çap merkeze yaklaşarak azalmaktadır. Gaz jetinin etki ettiği alanın dışında kalan alandan birincil hava ventüri kanalına sürüklenmektedir. Enjektörün ventüri kanalına yaklaşmasıyla da birincil havanın sürüklenebileceği alan artmakta ve daha fazla birincil hava sürüklenmektedir.
- Ventüri boğazının uzunluğu azaldıkça sürüklenme oranı artmaktadır. Boğaz uzunluğunun azalmasıyla sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybı azalmakta ve daha fazla birincil hava ventüri kanalından içeri girmektedir.
- Karışım odasının yüksekliği arttıkça sürüklenme oranı artmaktadır. Ventüri kanalından çıkan gaz ve hava karışımı kanal karşısındaki duvara çarpmakta ve dağılarak karışım odasına yayılmaktadır. Odanın yüksekliği (aynı zamanda hacmi) azaltıldığında ventüri kanalından çıkıp duvara çarpan karışımın dağılacığı hacim de azalmaktadır. Bu durum basınç kayıplarını da artıracığı için sisteme daha az birincil hava sürüklenmektedir.
- En fazla birincil hava sürükleyen tasarımın 9 numara ile belirtilen model olduğu görülmüştür. Bu modelde enjektör çıkış açısı  $0^\circ$  (düz enjektör), enjektör ile ventüri kanalı girişi arasındaki mesafe  $0,82a$ , ventüri boğaz uzunluğu  $0$  ve karışım odası yüksekliği  $1,15H'$  dir. Yapılan soğuk akış analizinde bu modeldeki sürüklenme oranının  $5,6$  olduğu hesaplanmıştır. Referans yakıcıda ise sürüklenme oranı  $4,12$  olarak belirlenmiştir. Bu durumda belirlenen boyutlardaki yakıcıda referans yakıcıya göre soğuk akışta yaklaşık  $\%35,9$  daha fazla hava sürüklendiği görülmüştür.
- Parametrik analizlere göre belirlenen uygun boyutlardaki yakıcıya yapılan tam yanma analizi sonucu sürüklenme oranı  $1,93$  olarak hesaplanmıştır. Referans

yakıcıya yapılan tam yanma analizi sonucu ise referans yakıcının sürüklenme oranının 1,22 olduğu görülmüştür. Bu durumda belirlenen boyutlardaki yakıcıda referans yakıcıya göre yanma analizi sonucu yaklaşık %58,2 daha fazla hava sürüklendiği belirlenmiştir. Soğuk akışa göre yanma durumunda daha az hava sürüklenmesinin bir nedeni yanma sebebiyle alınan birincil havanın sıcaklığının artması sonucu viskozitesinin de artmasıyla ventüri kanalından daha az birincil havanın geçmesidir. Diğer nedeni ise yanma sebebiyle alınan birincil havanın ısınarak yoğunluğunun azalması ve aynı alandan daha az hava geçmesidir.

- Parametrik analiz sonuçlarına göre belirlenen uygun boyutlardaki yakıcının üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak güç ölçümleri yapıldığında üretilen yakıcı ve referans yakıcının güç değerlerinin aynı olduğu görülmüştür. Referans yakıcının verim değeri deneysel olarak %55,8 olarak ölçülmüştür. Analiz sonuçlarına göre üretilen yakıcıya yapılan deney sonucunda ise verim değeri %57,1 olarak hesaplanmıştır. Böylelikle nümerik çalışmalar sonucu hesaplanmış sürüklenen birincil hava miktarının artmasıyla daha verimli bir yanma gerçekleştirildiği deneysel olarak kanıtlanmıştır.
- Referans yakıcının emisyon değeri deneysel olarak 580 ppm ölçülmüştür. Analiz sonuçlarına göre üretilen yakıcıya yapılan deney sonucunda ise emisyon değeri 360 ppm olarak hesaplanmıştır. Nümerik çalışmalarda hesaplanan sürüklenme oranının artmasıyla yanma için gerekli olan hava daha etkin bir şekilde yakıcıya sağlanmaktadır. Böylelikle havanın yetersiz olmasından kaynaklanan emisyonlar engellenmektedir. Nümerik çalışmalar sonucu belirlenmiş sürüklenen birincil havanın artmasıyla hava yetersizliğinden kaynaklı yanma sonu emisyon miktarının azaldığı deneysel olarak yapılan emisyon deneyleri sonucu kanıtlanmıştır.

Yapılan çalışmalara ek olarak ilerleyen zamanlarda bu tezde incelenen dört parametrenin yanında yakıcı port geometrisinin de sürüklenen birincil hava miktarına etkisi incelenebilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] BP Statistical Review of World Energy, Haziran 2016.
- [2] BP Energy Outlook, Ocak 2017.
- [3] Eyriboyun M., (2009). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Yanma Ders Notları, [http://makina.beun.edu.tr/eskisite/akademik\\_kadro/meyriboyun/MAK411/yanma\\_ders\\_notu\\_m\\_eyriboyun\\_zku.pdf](http://makina.beun.edu.tr/eskisite/akademik_kadro/meyriboyun/MAK411/yanma_ders_notu_m_eyriboyun_zku.pdf), 20 Eylül 2016
- [4] Çengel, Y.A. ve Boles, M.A. (2006). Thermodynamics: An Engineering Approach, Fifth Edition, McGraw-Hill.
- [5] Cantürk, B.I., (2015). Bir Yakıcıda Emisyona Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Turns, S.R., (2000). An Introduction to Combustion, Concepts and Applications, Second Edition, McGraw-Hill.
- [7] Jones, H.R.N., (1989). The Application of Combustion Principles to Domestic Gas Burner Design, British Gas.
- [8] Warnatz, J., Maas, U. ve Dibble, R.W., (2006). Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, Third Edition, Springer.
- [9] El-Mahallawy, F. ve El-Din Habik, S., (2002). Fundamentals and Technology of Combustion, First Edition, Elsevier.
- [10] Gattei, L., (2008). A Study On The Fluid Dynamics Of Domestic Gas Burners, Doktora Tezi, Bologna Üniversitesi, Bologna.
- [11] Defendi, Gas Burner with Multiple Flame Rings, Patent No: EP1781989 (B1), Alındığı Tarih: 09.12.2015.
- [12] Namkhat, A. ve Jugjai, S., (2010). "Primary Air Entrainment Characteristics for a Self-aspirating Burner: Model and Experiments", Energy, 35: 1701-1708.
- [13] Apinunt Namkhat ve Sumremg Jugjai, (2011). "Prediction of Total Equivalence Ratio for a Self-Aspirating Burner", TSME: Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering, 1: 31-36.

- [14] Ricou, F.P. ve Spalding D.B., (1961). "Measurement of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets", J. Fluid Mechanics, 11: 21-32.
- [15] Namkhat, A. ve Jugjai, S., (2010). "The Effect of Primary Air Preheat on the Primary Aeration of a Self-aspirating Burner", The First TSME International Conference on Mechanical Engineering, 20-22 Ekim 2010, Ubon Ratchathani.
- [16] Hemidi, A., Henry, F., Leclaire, S., Seynhaeve, J. ve Bartosiewicz, Y., (2008). "CFD Analysis of a Supersonic Air Ejector. Part I: Experimental Validation of Single-phase and Two-phase Operation", Applied Thermal Engineering, 29: 1523-1531.
- [17] Zhu, Y., Cai, W., Wen, C. ve Li, Y., (2008). "Numerical Investigation of Geometry Parameters for Design of High Performance Ejectors", Applied Thermal Engineering, 29: 898-905.
- [18] Liu, F., You, X., Wang, Q. Ve Zhang, R., (2013). "On Optimal Design and Experimental Validation of Household Appliance Burner of Low Pollutant Emission", Energy Conversion and Management, 76: 837-845.
- [19] Domestic Cooking Appliances Burning Gas, BS-EN- 30-1-1:2008+ A1 2010, 26 Ağustos 2010.
- [20] Domestic Cooking Appliances Burning Gas, DIN EN 30-2-1:1998+ A1:2003 + A2:2005, 1 Ağustos 2005.
- [21] Dantec Dynamics, PIV Ölçüm Prensipleri, <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>, 15 Şubat 2017
- [22] Ansys Fluent Kullanıcı Rehberi, ANSYS Inc 2016.
- [23] Minitab 17, Tutorials, Yazılım programı.



## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Mustafa ÖNAL  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 26.01.1993 – BOLU  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : onalmustafaa@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Isı-Proses / Mak. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	-
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	Bolu İzzet Baysal A.L.	2011

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
08.2015 – Devam ediyor	Arçelik A.Ş. Merkez Ar-Ge	Ar-Ge Mühendisi
03.2015 – 06.2015	Arçelik A.Ş. Merkez Ar-Ge	Bitirme Tezi Öğrencisi
08.2014 – 09.2014	TAI - TUSAŞ	Stajyer
07.2014 – 08.2014	ASELSAN	Stajyer
07.2013 – 08.2013	Arçelik A.Ş. BOLU PCİ	Stajyer

## **YAYINLARI**

### **Bildiri**

1. M. Önal, Ö. Ağra, "The Effect of Injector Geometry on Primary Air Entrainment", International Conference on Energy and Thermal Engineering (ICTE17), YTÜ, İstanbul, 483-489.

## **ÖDÜLLERİ**

1. Arçelik A.Ş. Patent Ödülü (2017)
2. Yıldız Teknik Üniversitesi Üniversite İkincisi, Makine Fakültesi İkincisi, Makine Müh. (2. Öğretim) Bölüm Birincisi (2015)