

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

BİR YAKICIDA EMİSYONLARA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

BERİA IŞIK CANTÜRK

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

**DANIŞMAN
Doç. Dr. ÖZDEN AĞRA**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR YAKICIDA EMİSYONLARA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Beria Işık CANTÜRK tarafından hazırlanan tez çalışması 17.12.2015 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. Ahmet Selim Dalkılıç
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyhan ONBAŞIOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Lisans hayatıma başladığım günden bugüne kadar her anımda yanımda olan, beni hep en iyiye yönlendiren, umutsuzluğa kapılmama asla izin vermeyen, hayata bakışıyla, duruşuyla daima örnek alacağım değerli hocam Sayın Doç. Dr. Özden AĞRA'ya yüksek lisans tez çalışmamda yaptığı katkılardan dolayı sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmam için gerekli imkân ve olanakları sunarak bana destek olan Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi Arge Direktörümüz Sayın Cem KURAL'a, Mekanik Teknolojiler Yöneticimiz Sayın Dr. Faruk BAYRAKTAR'a, Akışkanlar Dinamiği Teknolojileri Aile Liderimiz Sayın Dr. Levent AKDAĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansıma başladığım günden bu yana, her konuda bilgisine sonsuz güvendiğim, mühendislik hayatımda kendisini örnek almak istediğim, tez çalışmam boyunca bana liderlik eden Sayın Murat KANTAŞ'a her şey için çok teşekkür ederim.

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

Yüksek Lisans sürecim boyunca bana destek veren, Sayın Vasi Kadir Ertiş, Sayın Mutlu İpek, Sayın Mehmet MARAŞLI ve Sayın Osman AY başta olmak üzere Arçelik A.Ş. Ar-Ge Akışkanlar Dinamiği Ailesindeki tüm çalışan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatımdaki en büyük mutlulukları birlikte yaşadığım ve yaşayacağım, en zor zamanları birlikte aştığım, yaşama sebebim canımdan kıymetli Annem ve Babama tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Aralık, 2015

Beria Işık CANTÜRK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
YANMANIN GENEL TANIMI	4
2.1 Yanma Koşulları.....	4
2.1.1 Yakıt-Hava Karışımı	5
2.1.1.1 Teorik (Stokiyometrik) Yanma	5
2.1.1.2 Tam Yanma.....	5
2.1.1.3 Eksik Yanma.....	6
2.1.1.4 Kısmi Eksik Yanma	6
2.1.2 Tutuşma Sıcaklığı	6
2.1.3 Zaman	6
2.2 Yanma Tepkimeleri	6
2.3 Alevin Tanımı	7
2.3.1 Ön Karışımli Yanma.....	8
2.3.2 Ön Karışimsız Yanma (Difüzyon Alevi)	9

2.4	Yakıcılar	10	
2.4.1	Ocak Bekleri	10	
2.5	Emisyon Oluşumu	13	
2.5.1	Karbondiyoksit (CO ₂)	13	
2.5.2	Karbon monoksit (CO)	13	
BÖLÜM 3			
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI			15
3.1	Literatür Araştırması	15	
BÖLÜM 4			
DENEYSEL ÇALIŞMALAR			37
4.1	RAYLEIGH DENEYLERİ	37	
4.1.1	Lazerli Ölçüm Teknikleri.....	37	
4.1.2	Moleküllerin Rayleigh Saçınımları ile İlgili Temel Prensipler.....	39	
4.1.2.1	Moleküllerin Rayleigh Saçınım Karakteristiği.....	40	
4.1.2.2	Rayleigh saçınım ışık şiddeti.....	40	
4.1.2.3	Konsantrasyon ölçümü.....	40	
4.1.3	Rayleigh Termometresi	40	
4.1.3.1	Rayleigh Termometresi Bileşenleri ve Kullanımı.....	42	
4.1.3.2	Rayleigh Termometresi Görüntü Analizi.....	43	
4.1.4	Rayleigh Termometresi ile Sıcaklık Ölçüm Deneylei	45	
4.1.5	Rayleigh Termometresi ile Sıcaklık Ölçüm Deneylei Sonuçları	46	
4.2	Emisyon Deneylei	57	
4.2.1	CO Emisyon test düzeneği ve Emisyon Ölçümleri	61	
4.2.2	Deneysel Sonuçlar	63	
BÖLÜM 5			
YANMANIN SAYISAL MODELLENMESİ			65
5.1	Sonlu Hacimler Yöntemi	65	
5.2	Basınç Esaslı Çözüm Algoritması	66	
5.3	Yanma Analizinde Kullanılan Sayısal Çözümleme Metodu.....	66	
5.4	Detay HAD Analiz Çalışmaları	69	
5.4.1	Yanmanın Sayısal Modellenmesi için Oluşturulan Çözüm Ağı	71	
5.4.2	Oluşturulan Çözüm Ağı için Sınır Koşulları.....	72	
5.4.3	Yanma Reaksiyon Bileşenlerinin Özellikleri	73	
5.5	HAD Analiz Sonuçları.....	73	
BÖLÜM 6			
SONUÇLAR.....			78
KAYNAKLAR.....			80
ÖZGEÇMİŞ.....			81

SİMGE LİSTESİ

C	Karbon
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbondioksit
H ₂ O	Su
M	Kütle
c _p	Özgül ısı
H _v	Yakıt ısı değeri
Q	Güç
λ	Hava fazlalık katsayısı
η	Verim
Φ	Yakıt fazlalık katsayısı
Ω	Metan konsantrasyonu
Θ	CO emisyonu
°	Derece

KISALTMA LİSTESİ

GJ	Giga Joule
HY	Hava Yakıt Oranı
Kg	Kilogram
LPG	Liquefied Petroleum Gas
LRS	Laser Rayleigh Scattering
MJ	Mega Joule
RB	Radyal Burner
Re	Reynolds Number
SB	Swirl Burner
TEP	Ton Eşdeğer Petrol

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Ön Karışımli Bunsen bekinde alevin görünümü	8
Şekil 2. 2 Bunsen bekinde laminer yanmanın farklı modelleri	10
Şekil 2. 3 a) Ocak bekinin genel görünüşü b) Bekin patlatılmış görünüşü	11
Şekil 2. 4 Ocak bekinin kesit görünümü	11
Şekil 3. 1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi	16
Şekil 3. 2 Düşük kaliteli doğalgazla yapılan ısıtma deneyinde giriş basıncı P= 100 mm H ₂ O için zamana bağlı CO emisyon ve su sıcaklığı değerleri.....	17
Şekil 3. 3 Yüksek kaliteli doğalgazla yapılan ısıtma deneyinde giriş basıncı P= 150 mm H ₂ O için zamana bağlı CO emisyon ve su sıcaklığı değerleri.....	17
Şekil 3. 4 Yüksek kaliteli doğalgazla yapılan ısıtma deneyinde giriş basıncı P= 100 mm H ₂ O için zamana bağlı CO emisyon ve su sıcaklığı değerleri.....	18
Şekil 3. 5 Farklı ocak açıklıkları, ön havalandırma, doğalgaz çeşitleri ve giriş basınçları için etkinlik ve CO emisyonları.....	18
Şekil 3. 6 Farklı tencere yükseklikleri zamana bağlı etkinlik ve CO emisyon değerleri...	19
Şekil 3. 7 Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	21
Şekil 3. 8 (a) Radyal alevli yakıcının dış halkası (RB) (b) Döner alevli yakıcının dış halkası şematik görünümü.....	21
Şekil 3. 9 Radyal alevli yakıcıda (RB) ve dönel alevli yakıcıda (SB) çeşitli tencere yükseklikleri ve çeşitli ocak açıklıkları için verim ve CO emisyonu diyagramı ..	23
Şekil 3. 10 Radyal alevli yakıcılarda ve dönel alevli yakıcılarda çeşitli ocak açıklıkları için ön havalandırma miktarına göre verim ve CO emisyon diyagramı.....	24
Şekil 3. 11 Radyal alevli yakıcılarda (RB) ve dönel alevli yakıcılarda (SB) çeşitli ocak açıklıkları için giriş basıncına göre verim ve CO emisyon diyagramı	24
Şekil 3. 12 Radyal alevli ocaklarda ve döner alevli ocaklarda ısıl girdiye göre etkinlik ve CO emisyon diyagramı.....	25
Şekil 3. 13 Şekil Deney düzeneğinin şematik gösterimi	26
Şekil 3. 14 $\Phi=1,7$, $H/d= 4$ ve $S/d=10,4$ değerlerinde η ve Θ 'nın farklı Re sayılarında değişiminin grafiği	28
Şekil 3. 15 $Re=350$, $H/d=4$ ve $S/d=10,4$ değerlerinde yakıt fazlalık katsayısının (Φ), η ve Θ 'ya etkisinin grafiği.....	28
Şekil 3. 16 $Re=350$, $\Phi=1,7$ ve $S/d=10,4$ değerleri için farklı H/d oranının η ve Θ 'ya etkisinin grafiği	29
Şekil 3. 17 $Re=350$, $H/d=4$ ve $\Phi=4$ değerleri için farklı S/d oranının η ve Θ 'ya etkisinin grafiği.....	30
Şekil 3. 18 A-B-C tipi alevlerin görünümü	32

Şekil 3. 19 A-B-C tip alevlerin alev boyları-sıcaklık grafiği.....	33
Şekil 3. 20 A, B ve C tipi alevlerin $\Omega_{CH_4}=\%16,7$ ve $U_i=0,41m/s$ için ısı verim grafiği.....	34
Şekil 3. 21 $\Omega_{CH_4}=\%16,7$ ve $U_i=0,41m/s$ için ısıtma yüksekliği ısı verime etkisi grafiği	34
Şekil 3. 22 Farklı enjektör hızları ve metan konsantrasyonları için ısıtma yüksekliğinin verime etkisi	35
Şekil 3.23 Farklı enjektör hızları ve metan konsantrasyonları için $H\eta_{max}$ ve H_{IF} değerleri	36
Şekil 4. 1 Moleküllere etki eden Rayleigh-Raman saçınımları	38
Şekil 4. 2 Rayleigh-Raman saçınımlarının enerji seviyeleri	38
Şekil 4. 3 Partiküllerin büyüklüklerine göre farklı dalga boylarında yaptıkları saçınım grafiği	39
Şekil 4. 4 Rayleigh sisteminin şematik görünümü	42
Şekil 4. 5 a) Kalibrasyon görüntüsü b) Ölçüm görüntüsü	43
Şekil 4. 6 Yazılımın ölçüm kayıt ekranı	43
Şekil 4. 7 Yazılım üzerinde analiz metodu seçme ekranı	44
Şekil 4. 8 Rayleigh analiz metodu ekranı	45
Şekil 4. 9 Lazer ve kameranın beke göre konumu	46
Şekil 4. 10 Bek üzerinde tencerenin konumu	46
Şekil 4. 11 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 1'in sıcaklık dağılımı.....	47
Şekil 4. 12 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 2'nin sıcaklık dağılımı.....	47
Şekil 4. 13 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 3'ün sıcaklık dağılımı	48
Şekil 4. 14 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 4'ün sıcaklık dağılımı	48
Şekil 4. 15 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 5'in sıcaklık dağılımı.....	49
Şekil 4. 16 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 1'in sıcaklık dağılımı.....	49
Şekil 4. 17 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 2'nin sıcaklık dağılımı.....	50
Şekil 4. 18 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 3'ün sıcaklık dağılımı	50
Şekil 4. 19 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 4'ün sıcaklık dağılımı	51
Şekil 4. 20 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 5'in sıcaklık dağılımı.....	51
Şekil 4. 21 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 1'in sıcaklık dağılımı.....	52
Şekil 4. 22 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 2'nin sıcaklık dağılımı.....	52
Şekil 4. 23 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 3'ün sıcaklık dağılımı	53
Şekil 4. 24 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 4'ün sıcaklık dağılımı	53
Şekil 4. 25 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 5'in sıcaklık dağılımı.....	54
Şekil 4. 26 50 mm tencere yüksekliğinde düzlem 1'in sıcaklık dağılımı.....	54
Şekil 4. 27 50 mm tencere yüksekliğinde düzlem 2'nin sıcaklık dağılımı.....	55
Şekil 4. 28 50 mm tencere yüksekliğinde düzlem 3'ün sıcaklık dağılımı	55
Şekil 4. 29 450 mm tencere yüksekliğinde düzlem 4'ün sıcaklık dağılımı	56
Şekil 4. 30 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 5'in sıcaklık dağılımı.....	56
Şekil 4. 31 Emisyon deney düzeneğinin şematik görünümü	61
Şekil 4. 32 CO-CO ₂ Gaz analizörü.....	62
Şekil 4. 33 Numune alma aparatı	62
Şekil 4. 34 Farklı tencere yüksekliklerindeki CO emisyon grafiği.....	63
Şekil 5. 1 HAD analizleri için oluşturulan tepkime adımları	68
Şekil 5. 2 HAD analizleri için oluşturulan model	69
Şekil 5. 3 Yakıt-Hava Karışımının kütle kesrine göre incelenmesi.....	70
Şekil 5. 4 Çözüm Ağının Oluşturulması	72
Şekil 5. 5 Alev üzerinden alınan 5 düzlemin konumu	73

Şekil 5. 6 40 mm tencere yüksekliğinde sıcaklık sonuçları	74
Şekil 5. 7 40 mm tencere yüksekliğinde 5 düzlemde alınan sıcaklık dağılımları	74
Şekil 5. 8 43 mm tencere yüksekliğinde sıcaklık sonuçları.....	75
Şekil 5. 9 43 mm tencere yüksekliğinde 5 düzlemde alınan sıcaklık dağılımları.....	75
Şekil 5. 10 45 mm tencere yüksekliğinde sıcaklık sonuçları	76
Şekil 5. 11 43 mm tencere yüksekliğinde 5 düzlemde alınan sıcaklık dağılımları	76
Şekil 5. 12 47 50 mm tencere yüksekliğinde sıcaklık sonuçları.....	77
Şekil 5. 13 50 mm tencere yüksekliğinde 5 düzlemde alınan sıcaklık dağılımları	77

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Farklı ocak açıklıkları ve giriş basınçları için ısı girdi tablosu	22
Çizelge 4. 1 Sembollerin açıklamaları	41
Çizelge 4. 2 Deney gazları için CO ₂ Hacimsel Yüzdesi (Nötr Yanmanın Kuru Ürünleri) ..	57
Çizelge 4. 3 Wobbe Sayısına göre gaz ailelerinin sınıflandırılması.....	58
Çizelge 4. 4 Gaz bileşenlerinin içerikleri.....	58
Çizelge 4. 5 Gaz grupları veya ailelerine karşılık gelen farklı deney gazlarının ana özellikleri ve bileşimleri.....	59
Çizelge 4. 6 Deney gazlarının basınçları	60
Çizelge 4. 7 Gazın çeşidine göre azami CO içeriği	61
Çizelge 4. 8 Farklı Tencere yüksekliklerinde emisyon değerleri	63

BİR YAKICIDA EMİSYONLARA ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Beria Işık CANTÜRK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özden AĞRA

Enerji, dünyanın varoluşundan bu yana insanoğlunun üzerinde önemle durduğu bir konudur. Dünyadaki artan enerji kullanımı, çevre bilincini ve sürekliliğini de beraberinde getirmektedir. Enerji ihtiyacı karşılanırken çevre problemleri gün geçtikçe artmaktadır. Dünyada yaygın kullanıma sahip olan ev tipi yakıcılar, verimlerinde azalma olmadan ve emisyon değerleri yönünden limitlere uygun yanmalıdırlar. Ev tipi yakıcılarda genellikle doğalgaz kullanılmaktadır ve doğalgazın önemli bir bölümünü metan oluşturmaktadır. Yanma sırasında oluşacak kirletici emisyonlara neden olan parametrelerin belirlenmesi, emisyonları azaltmak için önemlidir. Literatürde yapılan çalışmalarda Reynolds sayısı, hava fazlalık katsayısı, ızgara yüksekliği, besleme basıncı gibi parametrelerin karbon emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Aynı şekilde alev sıcaklığının emisyonlar üzerine etkileri de teorik olarak çalışılmıştır. Bu çalışmada daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak ev tipi yakıcı olan ocak beklerinde farklı ızgara yüksekliğinde alev sıcaklığı Rayleigh Termometresi ile ölçülmüştür. Farklı ızgara yüksekliklerinde alev sıcaklığının emisyonlara etkisinin deneysel sonuçları, nümerik çalışmayla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ocak Beki, Yanma, Emisyon, Alev Sıcaklığı, Rayleigh Termometresi

**INVESTIGATION OF THE PARAMETERS THAT AFFECT A BURNING
EMISSIONS**

Beria Işık CANTÜRK

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Özden AĞRA

Since the day one of the world's existence, energy has been a very important issue that human beings urged upon. Within the raise of energy consuming, environmental conciousness and sustainabilty accompanies. Environmental problems occur and raise while the energy need is provided. Domestic burners, which are extensive around the globe, should burn without any decrease on the efficiency and fit by the limits for emmision values. Natural gas is widely used as the burner in domestic burners and methane forms highly important part of the natural gas. Determining the parameters that causes the dirty emmision which will occur during the burning, is highly important to reduce the emmision. The effect of the parameters like Reynolds number, equivalence ratio, the height of the hob, feeding pressure, to the carbon emmision were investigated in the literature. Likewise the effects of the flame temperature was also theoretically investigated. In this study, as a difference to the previous studies, the flame temperature of the home type burner becks on different hob heights was measured using the Rayleigh Thermometry. The experimental values of the flame temperatures effect to the emmissions on different hob heights were compared to the numerical study.

Keywords: Domestic burner, Combustion, Emission, Flame Temperature, Rayleigh Thermometry

1.1 Literatür Özeti

Enerji, dünyanın varoluşundan bu yana insanoğlunun üzerinde önemle durduğu bir konudur. Dünyadaki artan enerji kullanımı, çevre bilincini ve sürekliliğini de beraberinde getirmektedir. Enerji ihtiyacı karşılanırken çevre problemleri gün geçtikçe artmaktadır.

Doğal çevreyi tüm insan faaliyetleri etkilemektedir. Bu faaliyetlerin en etkililerinden biri enerji alanıdır. Sanayi devriminin başlangıcından beri giderek artan ve aşırı boyutlara ulaşan, artış tükenme pahasına sürdürülen fosil yakıt kullanımı, enerji-çevre sorunlarının oluşmasının temel nedenidir. Diğer enerji kaynaklarının da doğal çevre üzerinde etkileri vardır. Onların kullanımı fosil yakıtlar düzeyine ulaşmadığından, teknolojilerinin farklılığından etkileri daha sınırlı bulunmaktadır. Ancak, teknik ve teknolojik açıdan, enerjinin kirlisi yoktur ama üretim teknolojisinin kirlisi vardır. Dolayısı ile temiz üretim, temiz ürün çözüm yolu görülmelidir. Bugün enerji ve çevre kirlenmesi denilince, fosil yakıtların yanma emisyonları anlaşılmaktadır. Fosil yakıtların en önemli çevre etkisi CO₂ emisyonudur. Yakıtın C içeriğine bağlıdır. Fosil yakıt kullanımında CO₂ emisyonu doğal gazda 52-54,8 kg/GJ kadardır. Ülkemizde fosil yakıtların tam yanma koşullarında CO₂ emisyonu doğal gazda 2,051 CO₂/tep kadardır. Tüm teknolojilerin bir değişiklik ve bir risk oluşturduğu gerçektir. Çünkü teknoloji, insanların çevreyi değiştirmek için uyguladıkları tekniklerin tümü olup, her teknolojinin olumlu ve olumsuz çevre değişiklikleri getirmesi kaçınılmazdır. Bunun en güzel örneği, çevre

dostu ve yeşil enerjiler denilen yeni ve yenilenebilir kaynakların bile, olumlu yanlarının yanı sıra, karşı çıkılabilen olumsuz çevre etkilerinin bulunabilmesidir [1].

Dünyada tüketilen enerjinin büyük bölümü fosil yakıtlardan elde edilmektedir. British Petrol Dünya Enerji İstatistikleri raporuna göre ülkemizde doğalgaz tüketimi bir önceki yıla göre 2014'te %6,5 oranında artarak 48,6 milyar metreküp olarak gerçekleşmiştir. Küresel gaz tüketimi ise %1,6 ile 10 yılın ortalaması olan %2,5'in altında büyümüştür [2].

Son yayınlanan 2013 yılı emisyon raporuna göre Türkiye'deki CO₂ emisyonu 4,408 tep iken Dünya ortalaması 4,936 tep kadardır. 2000 yılı emisyon değerlerine göre yaklaşık %23, 2010 yılı emisyon değerlerine göre %6 artmış göstermiştir [3].

Dünyada emisyon değerlerindeki, tehlikeli artışı bizleri de enerji kaynaklarımızı kullanırken verim değerleri açısından maksimum, buna karşılık emisyon değerleri açısından optimum değerde kullanmaya mecbur bırakmaktadır. Emisyonların azaltılması için yanma sırasında hava fazlalık katsayısının, alev sıcaklığının, yanma odası büyüklüğünün kontrol altında tutulması gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada, ev tipi bir ocakta ızgara yüksekliğine bağlı olarak alevin yapısı ve alev sıcaklıklarının etkileri deneysel olarak hesaplanmış ve nümerik çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

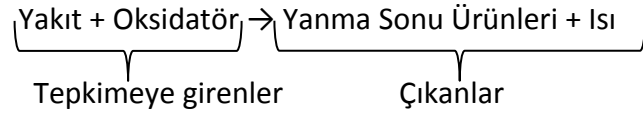
Bu tezin amacı; yanma sırasında emisyonlara neden olan başlıca parametreleri, deneysel ve nümerik olarak incelemektir. Literatürde yapılan çalışmalar araştırılarak, ev tipi yakıcılarda emisyonlara neden olan ızgara yüksekliği, alev yapısı ve sıcaklığı gibi parametreler belirlenmiştir. Farklı ızgara yüksekliklerinde tencereye çarpan alevin, yapısı ve sıcaklığının değişiminin karbon emisyonlarına olan etkisini araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 2 farklı deney düzeneği kullanılmıştır. Rayleigh Termometresi ile farklı ızgara yüksekliğinde ocak beklerinden çıkan alevin sıcaklıkları ölçülmüştür. Gaz analizörüyle de farklı ızgara yüksekliklerindeki CO-CO₂ emisyonları belirlenmiştir. Yapılan nümerik çalışmayla da deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

1.3 Hipotez

Ev tipi bir ocak bekinde, ızgara yüksekliğinin emisyonlara etkisinin büyük olduğu belirlenmiştir. Farklı ızgara yüksekliklerinde tencereye çarpan alevin, yapısı ve sıcaklığının değişmesinden emisyonların etkileneceği düşünülmüştür. Yapılan deneysel ve nümerik çalışmalarla bu etkinin varlığı araştırılmıştır.

YANMANIN GENEL TANIMI

Yanma, kimyasal enerjinin termik enerjiye dönüşümü yoluyla ısı elde edilen kimyasal bir olaydır. Yanma işlemi sırasında kimyasal tepkimeden önce varolan maddelere yanma işlemine girenler, tepkimeden sonra oluşan maddelere de yanma işleminden çıkanlar veya yanma sonu ürünleri denir.



Yanma tepkimeleri, termodinamiğin esas kanunları ve kütle korunumu ilkesine göre dengelenmektedirler. Tepkimeye giren hava ile yakıtın miktarlarını belirlemek için yanma işlemlerinde hava yakıt oranı (HY) olarak adlandırılan bir büyüklük kullanılmaktadır. Genellikle kütleli olarak ifade edilir ve bir yanma işleminde hava kütleli yakıt kütleli oranı olarak tanımlanmaktadır. [4]

2.1 Yanma Koşulları

Bir yanma tepkimesinin başlayıp tamamlanabilmesi için 3 şartın bir araya gelmesi gerekmektedir.

- Yakıt-hava karışımı
- Tutuşma sıcaklığı
- Zaman

2.1.1 Yakıt-Hava Karışımı

Bir yakıtın tam olarak yanması için gerekli en az hava miktarına, stokiometrik veya teorik hava denir. Yanma işleminin gerçekleşmesi için yakıt ve havanın uygun oranlarda bulunması gerekmektedir. Yakıt ile havanın iyi bir karışım oluşturması gerekmektedir. Bu karışımın hızı da oksidasyonun sağlanması için önemlidir. Gerçek yanma işlemlerinde yanmanın tama yakın olmasını sağlamak ve çıkış sıcaklığını belirli bir düzeyde tutabilmek için genellikle stokiometrik miktardan daha fazla hava kullanılmaktadır. Stokiometrik miktarın üzerinde olan hava miktarına fazla hava denir. Fazla hava genellikle stokiometrik hava esas alınarak, fazla hava yüzdesi veya teorik hava yüzdesi olarak ifade edilir. Örneğin yüzde 50 fazla hava, yüzde 150 teorik hava anlamına gelmektedir. Stokiometrik miktardan daha az hava, eksik hava diye nitelendirilmekte ve eksik hava yüzdesi diye ifade edilmektedir. Örneğin yüzde 90 teorik hava, yüzde 10 eksik hava diye tanımlanmaktadır. Yanma işleminde kullanılan hava miktarı, hava fazlalık katsayısı λ ile de gösterilebilir. Hava fazlalık katsayısı, gerçek hava yakıt oranının stokiometrik hava yakıt oranına bölünmesiyle (2.1) ile bulunmaktadır.

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

Yanma işlemi sırasında oksijen miktarına göre yanma olayı 4 kısımda incelenmektedir.

2.1.1.1 Teorik (Stokiometrik) Yanma

Yakıtın teorik havayla tam olarak yandığı ideal bir yanma işlemine, yakıtın stokiometrik veya teorik yanması denir. Bir yakıt, teorik havayla tam olarak yandığı zaman yanma sonu ürünleri arasında serbest oksijen bulunmaz. Stokiometrik yanma için hava fazlalık katsayısı $\lambda=1$ 'dir.

2.1.1.2 Tam Yanma

Yanma işlemi sırasında, eğer yakıtın içindeki karbonun tümü CO_2 'ye hidrojenin tümü H_2O 'ya ve varsa kükürtün tümü SO_2 'ye dönüşüyorsa, yanma tamdır. Yakıt içerisinde bulunan yanabilecek tüm bileşenler tam olarak yanarlar. Hava fazlalık katsayısı $\lambda>1$

durumundadır. Yakıttan maksimum verimi alabilmek için endüstriyel uygulamalarda tam yanma amaçlanmaktadır.

2.1.1.3 Eksik Yanma

Yanma sonu ürünleri arasında yanmamış yakıt veya C_2, H_2, CO ve OH gibi bileşenler varsa yanma işlemi tam değildir. Yakıt tam olarak oksijen ile buluşmadığı için, yanma tam olarak gerçekleşmez bu sebeple de verim düşmektedir. Hava fazlalık katsayısı $\lambda < 1$ halindedir.

2.1.1.4 Kısmi Eksik Yanma

Hava fazlalık katsayısının $\lambda > 1$ olmasına rağmen yanma sonu ürünlerinde C_2, H_2, CO ve OH gibi bileşenler görülmektedir. Yanma odasındaki karışım, sıcaklık değişimi veya zaman gibi faktörlerin yetersizliğinden dolayı gerçekleşebilir.

2.1.2 Tutuşma Sıcaklığı

Bir yakıtın oksijenle temas etmesi yanmanın başlaması açısından yeterli olmamaktadır. Yanmanın başlayabilmesi için yakıtın tutuşma sıcaklığına getirilmesi gerekmektedir. Bazı yakıtların atmosferik havada tutuşma sıcaklıkları şu şekildedir: Benzin $260^\circ C$, karbon $400^\circ C$, hidrojen $580^\circ C$, karbon monoksit $610^\circ C$, metan $630^\circ C$ 'dir [4].

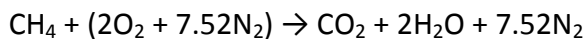
2.1.3 Zaman

Tam yanma için, uygun sıcaklıkta, oksijen moleküllerinin yakıt ile teması sağlandıktan sonra ancak yeterli süre geçtikten sonra tepkime tamamlanmaktadır.

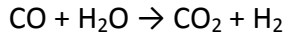
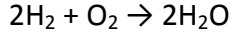
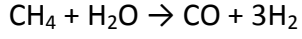
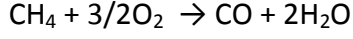
2.2 Yanma Tepkimeleri

Yanma işlemi tek bir aşamada olmayıp, birçok yan tepkime aynı anda gerçekleşmektedir.

Metanın hava ile stokiometrik yanma tepkimesi



Şeklindedir. Hidrokarbonların yanma işleminde son ürünler olarak su buharı (H₂O) ve karbondioksit (CO₂) açığa çıkmaktadır. Ancak C_nH_{2n+2} formüllü bir alkanın parçalanması aşamasında CO₂, H₂O, CO, OH gibi pek çok ara ürün oluşmaktadır. Metanın yanmasıyla birçok ara tepkime gerçekleşmektedir. Bu tepkimelerden bazıları aşağıda verilmiştir:



2.3 Alevin Tanımı

Yanmanın olduğu bölgeye alev adı verilmektedir. Alevin rengi karışımın içeriği hakkında bilgi vermektedir ve temel olarak birkaç bölgeden oluşur.

Yakıtça zengin bölge: Yakıt-hava karışımında yakıtın fazla olduğu bölgedir. Gaz jetinden çıkan yakıt, henüz hava ile yeterli miktarda karışmadığından yanmanın oluşmadığı bölgedir. Alevin koyu lacivert bölgesidir.

Yanmanın başladığı yakıtça zengin bölge: Yakıt-hava karışımında, yakıtın biraz fakirleşmesiyle yanmanın başladığı bölgedir. Bu bölge çok incedir ve parlak mavi tabakanın hemen altında kalmaktadır.

Stokiyometrik yanma bölgesi: Yakıt-hava karışımının ideal orana gelmesiyle oluşan bölgedir. Bu bölgede tam yanma gerçekleştiğinden yakıtın en verimli olduğu bölgedir. Bu sebeple alevin en sıcak kısmıdır. Parlak mavi renkte görülmektedir.

Eksik yanma bölgesi: Yakıt-hava karışımında yakıtça fakir bölgedir. Diğer bölgelere kıyasla da daha büyüktür.



Şekil 2. 1 Ön Karışımli Bunsen bekinde alevin görünümü (1.Yakıtça zengin bölge 2. Yanmanın başladığı yakıtça zengin bölge 3.Stokiometrik yanma bölgesi 4.Eksik yanma bölgesi)

Yanma, yakıt-hava karışımına göre ön karışımli ve ön karışimsız, akış hareketine göre de türbülanslı ve laminer olarak sınıflandırılabilir [5].

2.3.1 Ön Karışımli Yanma

Yakıt ve hava ayrı ayrı istenilen miktarda ayarlanarak gönderilmekte ve yanmadan önce karışarak düzgün bir alev elde edilmesi sağlanmaktadır. Kendi içerisinde tam ön karışımli ya da kısmi ön karışımli olarak ayrılmaktadır. Tam ön karışımli tipte yakıtın tamamı stokiometrik yanma oranına göre yeterli hava ile karışım odasında karıştırılmaktadır. Kısmi ön karışımli yanmada ise, stokiometrik ordandaki havanın % 60-80'i önceden emilerek yakıtla karıştırılmaktadır. Yakıt-hava karışımı karışım odasından çıktıktan sonra da daha miktar hava ile karıştıktan sonra karışım ateşlenmektedir. Ön karışımli alevler, düfzyon alevlerine göre daha yüksek sıcaklıktadırlar.

Kısmi ön karışımli alevler içten yanmalı motorlardan çeşitli kazanlara ve ocak beklerine kadar geniş bir alanda kullanılır. Karışım portlara geldiğinde henüz tam olarak karışmamıştır, yani zengin bir karışımdır. Bu oran alevin tutuşabileceği sınırların üzerindedir. Karışım portlardan çıkınca belirli bir mesafe boyunca bu yüzden

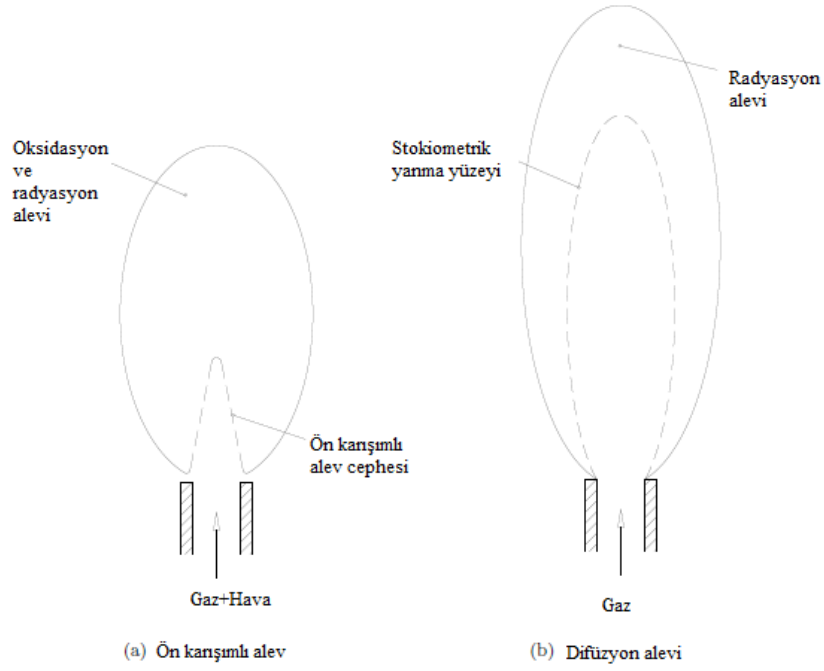
tutuşamaz. Bu kısım alevin çekirdek kısmını oluşturur ve yanma tepkimesi olmaz. Daha sonra çevre havasıyla yavaş yavaş karışan karışım tutuşur. Çekirdeğin etrafında sırasıyla önce zengin karışım, sonra sitokiyometrik karışım, daha sonra da fakir karışım yanar. Alev cephesi akış ile kararlı bir dengeye gelene kadar port çıkışlarına doğru ilerler. Alev cephesinin hemen gerisinde tam yanmanın olmadığı bölgede oluşan H_2 ve CO yanar. Oluşan alev mavi renklidir. Bu da yine bileşenlerin verdiği ışıldama sonucudur. Sonuç olarak alevin rengi karışımın tipi ve içeriği hakkında bilgi vermektedir.

- a) Türbülanslı Ön Karışımli Yanma: Benzinli motorlarda, gaz türbinlerinde
- b) Laminer Ön Karışımli Yanma: Fakir karışımli bek alevi, Bunsen alevi

2.3.2 Ön Karışimsız Yanma (Difüzyon Alevi)

Yakıt, herhangi bir yerde hava ile temas etmeden direk olarak atmosferik ortama çıkıyor ve böylece tutuşuyorsa buna ön karışimsız alev ya da difüzyon alevi denir. Yakıt olarak çıkan gaz yükseldikçe taşınım ve difüzyon yoluyla hava ile karışmaktadır. Bu karışım da genellikle difüzyon yanmadan hızlı gerçekleşmekte, bu sebep ile de tam yanma gerçekleşmemektedir. Ön karışimsız yanma tepkimelerinde is ve diğer kimyasal maddelerden kaynaklı emisyonlar daha fazladır. Alev içerisinde tepkime sonrası ürünler olarak çıkan C_2 ve CH bileşenlerinin kimyasal olarak ışıldaması sonucu sarı-turuncu renkler görülmektedir.

- a) Türbülanslı Ön Karışimsız Yanma: Dizel motoru, brülörler
- b) Laminer Ön Karışimsız Yanma: Mum alevi, odun alevi



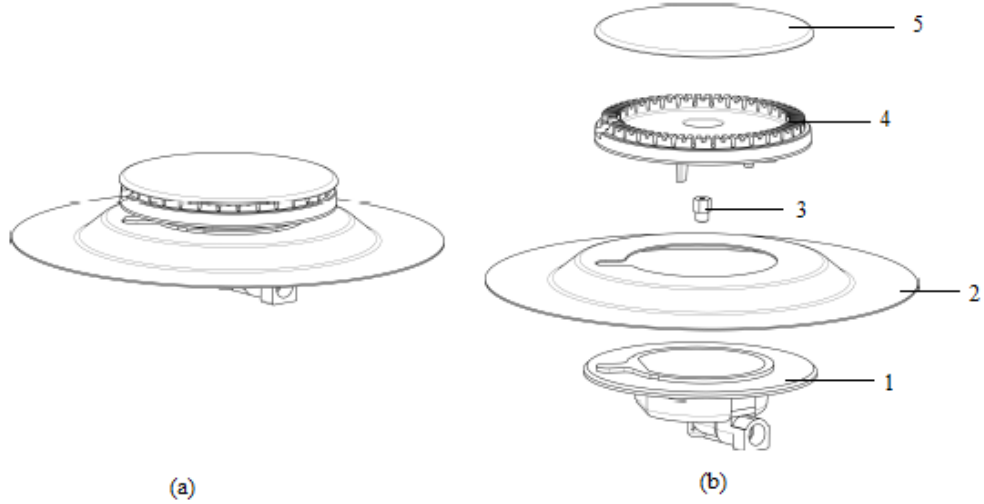
Şekil 2. 2 Bunsen bekinde laminer yanmanın farklı modelleri

2.4 Yakıcılar

Yakıcılarda, iyi bir yanma işleminin gerçekleşebilmesi için yakıt ve havanın iyi bir karışım oluşturması sağlanarak yakıt sonu emisyonlarının belirli sınırı aşmamları sağlanmalıdır. Yakıcıları sınıflandırabilmek için birçok yöntem vardır. En bilinen yöntemlerden biri ise yanma başlamadan önce yakıt-hava karışımının nasıl sağlandığı ile yapılan sınıflandırmadır. Daha önce bahsettiğimiz gibi ön karışımli ve ön karışimsız (difüzyon alevi) olmak üzere 2 farklı karışım şekli vardır. Ön karışımli yakıcılarda, difüzyon alevlerine göre daha kısa ve daha yüksek sıcaklıkta alev oluşmaktadır. Bu tez kapsamında geleneksel gaz yakıcılar yani ocak bekleri inceleneceği için daha çok ön karışımli yanma anlatılacaktır.

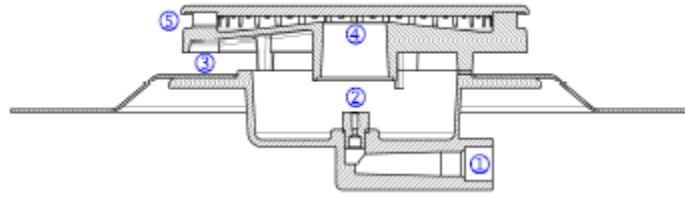
2.4.1 Ocak Bekleri

Piştirici cihazlarda kullanılan ocak bekleri, kısmi ön karışımli alev olarak tanımlanmaktadır. Bir ocak bekinde ait genel çizim şekilindeki gibidir.



Şekil 2.3 a) Ocak bekinin genel görünüşü b) Bekin patlatılmış görünüşü (1.Karışım odası 2. Ocak sacı 3. Enjektör 4. Bek kafası 5. Bek şapkası)

Eski tip ocakların yakıcıları genellikle yuvarlak delinmiş portlara sahip dökme demir yapıdadırlar. Daha sonra ise bekler, yarıklı portlara sahip preslenmiş metal kullanılarak üretilmiştir. Böylelikle portlardan alevler yatay ve kısmen yukarı doğru çıkmaktadır. Yeni nesil bekler ise, basınçlı döküm ile alüminyum alaşımından üretilmektedir.



Şekil 2.4 Ocak bekinin kesit görünümü

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi besleme hattından (1) , gaz gelir ardından enjektör nozülünün küçük deliğinden (2) çıkar. Gaz basıncı ve nozülün boyutları oranında enjektörden gaz çıkışı olur. Enjektörden çıkan gaz momentumun korunumu prensibi ile ortam havasından karışım odasına birincil havayı (3) sürükler. Yakıt- hava karışımı, konik ventüri veya paralel duvarlara sahip karışım odasına girer. Karışım odası, yakıt ve havanın tam olarak karışabileceği bir yer olarak tasarlanır böylelikle yakıt-hava karışım oranı bek kafası boyunca sahip kalır. Karışım odasının boğazının yani ventüri kanalının (4) geometrisine bağlı olarak karışım büyük ölçüde tamamlanır. Yakıt-hava karışımının statik basıncı, atmosfere doğru azalır. Yakıcıdaki alev portlarının içerisinde alevin çıkabilmesi için statik basıncın buradaki direnci yenebilecek kadar yükselmesi gerekmektedir. Basınç artışı ancak, momentumun ve hızın azalmasıyla sağlanabilir ve

bu sadece bek kafasında kademeli genişlemeyle ortaya çıkmaktadır. Yakıt-hava karışımı alev portlarından (5) çıkmadan önce bek kafasına doğru akmaktadır. Karışım yakıcı portlarına uniform olarak dağılmaktadır. Bek portlarının yapısı, yakıcının tipine ve verimine göre farklılık göstermektedir. Bu tez çalışmasında incelenen geleneksel gaz yakıcılar, 2 tip alev portu bulundurmaktadır. Bunlardan biri ana alevin çıktığı port diğeri ise ana aleve yardımcı rol üstlenen pilot alev portudur. Alev portları, yakıcının çevresi boyunca eşit boşluklarla yerleştirilmiştir.

Yakıt-hava karışımı doğru şekilde sağlandıktan sonra, karışım bir tür çakmakla tutuşturulur. Genellikle ocakta kullanılan bekler 1-5 kW arasında değişmektedir. Bekte güç kontrolü musluk yardımıyla gaz akışını ayarlayarak yapılmaktadır.

Geleneksel gaz yakıcılar, yakıtı kullanılabilir ısıya dönüştürerek ısıtmayı sağlamaktadır. Bunun için de yakıcıda bulunması gereken bir takım özellikler şu şekildedir:

- Kısılma ayarı, alevin geri kaçmasını neden olmayacak şekilde tasarlanmalıdır.
- Isıtılacak olan alanda ısı dağılımı uniform olmalıdır.
- Yakıtın tam yanmasını sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.
- Alevin portlardan çıkışında kopmadığından emin olunmalıdır.
- Ateşleme yapıldığında alevin portlarda hızlı şekilde yayılması sağlanmalıdır.
- Ateşleme, yanma ve sönme durumlarında sessiz çalışmalıdır.
- Cihazın kullanım ömrü boyunca ısıtma veya soğutma durumlarında dayanıklı olmalıdır.

Yakıcılarda, tasarım parametrelerine uyulduktan sonra, kullanıldığı ülke ve yakıtın türüne göre belirlenmiş standartlara uyulmalıdır. Bu standartlar içerisinde emisyon limitleri, kullanıcı sağlığı ve çevre konularından dolayı daha fazla önem taşımaktadır. Emisyon limitleri kullanılan gazın çeşidine göre farklılık göstermektedir. İlerleyen bölümlerde bu standartlar anlatılacaktır. Emisyon oluşumunu engellemek için yakıt-hava karışımı stokiometrik oranda olmalı, alevin geri kaçması veya uçmasını engellenmeli, stabil alev oluşturulmalı, ocaklarda kullanılan ızgaraların yüksekliklerine, ortamda bulunan taze havaya dikkat edilmelidir. Tez çalışması içerisinde yanma sırasında emisyonu sebep olan parametrelerin etkisi üzerinde durulacaktır [5].

2.5 Emisyon Oluşumu

Emisyon, havaya bırakılan veya çeşitli kaynaklardan yayımı yapılan gaz ve parçacıkları tanımlamak üzere kullanılan terimdir. Genel olarak, yakıt ve benzerlerinin yakılmasıyla; sentez, ayrışma, buharlaşma ve benzeri işlemlerle; maddelerin yığılması, ayrılması, taşınması ve diğer mekanik işlemler sonucu bir tesisten atmosfere yayılan hava kirleticileri olarak tanımlanır. Yanma işlemi sırasında pek çok kimyasal tepkime eşzamanlı olarak gerçekleşmekte ve yanma sonu ürünle farklı kimyasal bileşimler içerebilmektedir. Bunların pek çoğu insan sağlığı ve çevre açısından istenmeyen ürünlerdir. Ev tipi ocaklarda standartlar gereği karbon emisyonlarına dikkat edildiğinden tez çalışması kapsamında bu konu anlatılacaktır.

Karbon bileşikleri olarak kast edilen karbon temelli gazlar CO ve CO₂'dir.

2.5.1 Karbondioksit (CO₂)

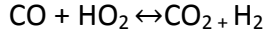
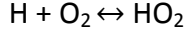
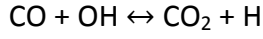
Karbondioksit, solunum yapan metabolizma ürünü ve içinde karbon içeren her yakıtın normal son yanma ürünüdür. CO₂ emisyonu karbon içerikli yakıtların (fosil yakıtlar: petrol, doğal gaz, kömür vb) yanması sonucu karbondioksitin oluşarak atmosfere karışmasıdır. Hava kalitesini olumsuz etkilemesinin yanında en çok üzerinde durulan konu atmosferde yükselerek sera gazı etkisine yol açmasıdır. Yani yer yüzünden yansıyan güneş ışınlarının uzaya çıkmadan tekrardan dünyaya dönmesiyle yer kürenin sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple de CO₂ emisyonlarına son dönemde

2.5.2 Karbon monoksit (CO)

Yakıtın eksik yanması sonucu oluşan, yoğunluğu havaya yakın bir gaz olan CO renksiz, kokusuz ve oldukça zehirli bir gazdır. Karbon monoksitin temel oluşum mekanizması aşırı zengin yanma şartlarıdır. CO oluşumu, esas olarak son ürün CO₂'ye neden olan hidrokarbon oksidasyon prosesi içindeki bir ara kademedir.



R hidrokarbon radikalini göstermektedir. Oluşan CO daha sonra düşük reaksiyon hızlarında CO₂'ye okside olur.



CO emisyonlarını kontrol eden ana parametre karışımın yakıt-hava oranıdır. Zengin karışımlarda, CO konsantrasyonu yakıt/hava oranı ile birlikte sürekli olarak artar ve oksijen eksikliği eksik yanmaya neden olur. Yanma ürünleri arasında CO bulunmasının esas nedeni oksijen eksikliğidir. Yüksek alev sıcaklıklarında X denklemine göre CO₂ miktarına oranla daha fazla CO oluşmaktadır. Sıcaklıklar düştükçe CO'nun CO'ye oksidasyonu söz konusudur. Bu durumda fakir ve stokiometrik karışımlarda yanma sonunda daha az CO oluşurken, zengin karışımlarda düşük sıcaklıklarda oksijen yetersizliği nedeniyle yüksek miktarda CO bulunmaktadır. Yanma sırasında yüksek sıcaklıktan dolayı alev cephesinde çok miktarda CO oluşmaktadır. Daha sonra gazların genişlemesi ve soğuması sırasında, oksidasyon sonucu CO, CO₂'ye dönüşmektedir.



Şeklinde tanımlanan denge reaksiyonu sıcaklığa bağlı olarak oluşmaktadır. Bu nedenle yanma odası sıcaklığının düşürülmesi CO emisyonlarını azaltmaktadır [6].

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

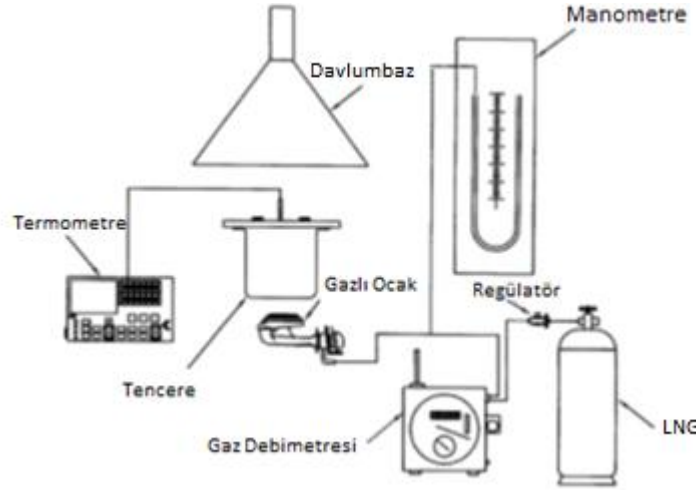
3.1 Literatür Araştırması

Bir yakıcının performansını etkileyen parametreler aynı zamanda emisyon değerlerini de etkilemektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda yakıcı performansı ve yanma emisyonları konuları birlikte incelenmiştir. Bu çalışmalarda genellikle ısıtma yüksekliği, yanıcı gazın özellikleri, yakıcının tasarımı, hava debisi, alevin boyu, hava-yakıt oranı, gazın hızı gibi parametrelerin yakıcı performansı ve emisyonlarına etkilerinin baskın olduğu saptanmış ve detaylı araştırılmıştır. Bu tez kapsamında da literatürde yapılan araştırmalardan yola çıkılarak ısıtma yüksekliği (tencere yüksekliği), alev boyu ve alev sıcaklığının etkileri incelenmiştir.

Ta-Hui Lin ve Yung-Chang Ko'nun (2003) [7] yaptığı çalışmada yakıcı performansını etkileyen en etkili parametrenin yakıtların bileşenlerine bağlı olarak değişen ısı değer olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada gaz bileşenlerinin değişimlerinin yakıcı performansına etkilerini ve geleneksel gaz ocaklardaki farklı ısı değerlerindeki yanan doğal gazların işletme şartları ve dizayn parametrelerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Gaz bileşenleri, birincil havalandırma, gaz debisi, gaz besleme basıncı ve ısıtma yüksekliği (tencere yüksekliği) gibi 5 temel parametrenin CO emisyonu ve ısı verimlilik üzerine etkileri tartışılmış ve raporlanmıştır. Düşük ısı değere sahip doğal gaz yerine yüksek ısı değere sahip doğal gaz kullanmak ısı verimliliğinde azalmaya, CO emisyonlarında artışa neden olmak gibi problemler yaratmaktadır. Bu problemler, gaz basıncını uygun değerlere azaltma, birincil havalandırmayı elverişli seviyelere genişletme, doğru ısı güç seçimi ve optimum ısıtma yüksekliğine ulaşma ile önemli ölçüde giderilecektir.

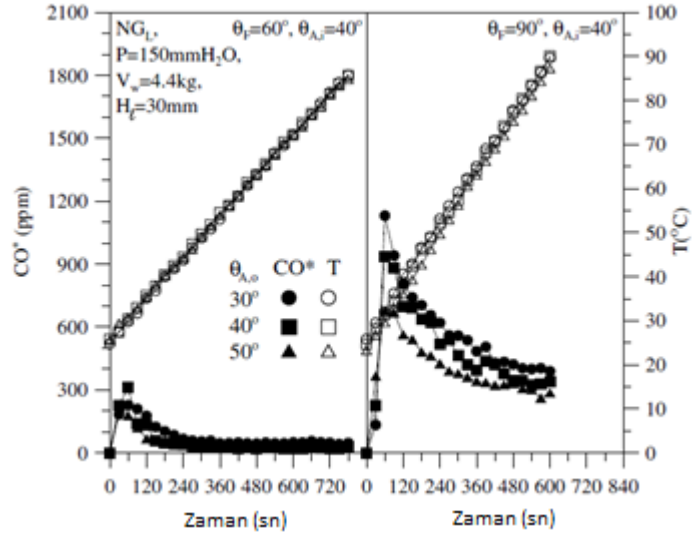
Bu çalışmada, yüksek ve düşük kaliteli doğal gazların etkinlik ve gaz emisyon testleri yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Yapılan testlerde kullanılan deney düzeneğinin, şematik resmi Şekilde verilmektedir.

Deneylerde yüksek kaliteli doğalgaz (NG_H), düşük kaliteli doğalgaz (NG_L) olmak üzere fiziksel özellikleri farklı 2 çeşit doğalgaz kullanılmıştır.

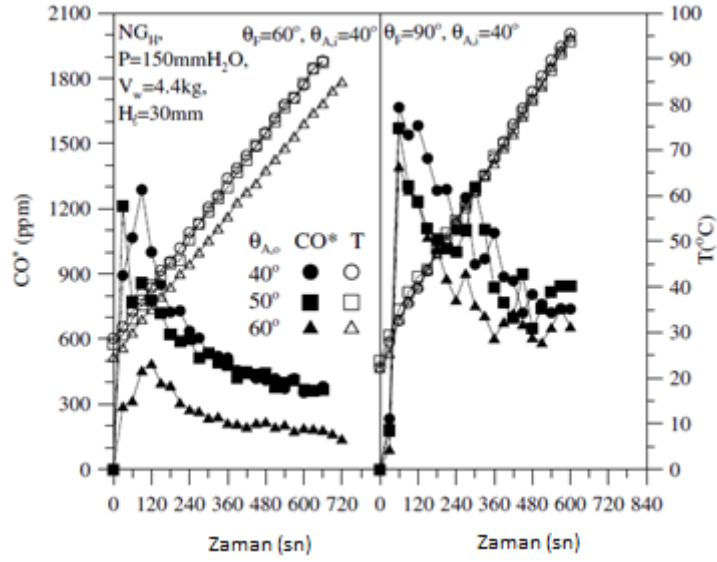


Şekil 3.1 Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Düşük kaliteli doğalgaz için $P = 100 \text{ mm H}_2\text{O}$ basınçta yapılan deneylerde elde edilen CO emisyonu ve sıcaklık değişimleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Grafikteki CO emisyonundaki anlık yükselişin sebebinin, alevi soğuk yüzeye çarpması ve çarpan yüzeylerde bölgesel sönmeler olmasından kaynaklanmıştır. Bu değer, tencerenin ısınması ile yavaş yavaş azalıp denge konumuna gelmektedir. Ayrıca yüksek ısıl girdide yani yüksek ocak açıklığında (Şekil 3.2 – sağdaki grafik) CO emisyonlarının da kayda değer bir biçimde arttığı gözlenmektedir. Bu değer de ön havalandırma ile azaltılabilmektedir.

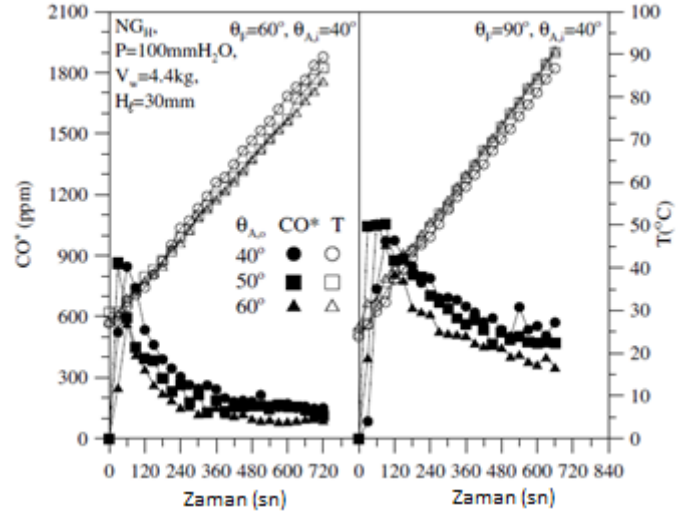


Şekil 3.2 Düşük kaliteli doğalgazla yapılan ısıtma deneyinde giriş basıncı $P=100$ mm H_2O için zamana bağlı CO emisyon ve su sıcaklığı değerleri



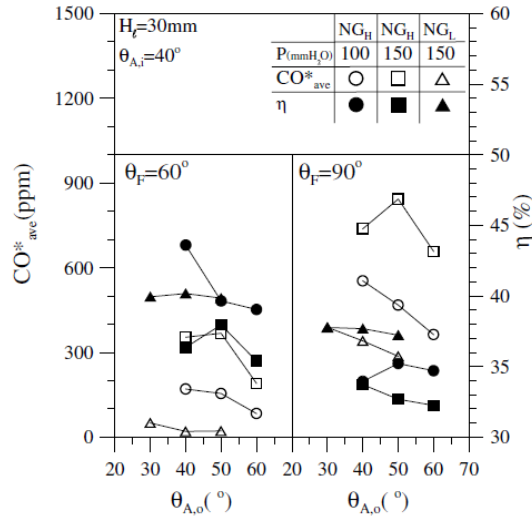
Şekil 3.3 Yüksek kaliteli doğalgazla yapılan ısıtma deneyinde giriş basıncı $P=150$ mm H_2O için zamana bağlı CO emisyon ve su sıcaklığı değerleri

Yüksek kaliteli doğalgaz ($P=150$ mm H_2O) (Şekil 3.3) ile düşük kaliteli doğalgaz ($P=100$ mm H_2O) (Şekil 3.2) grafikleri karşılaştırıldığında yüksek kalitelide CO emisyonlarının düşük kaliteliye göre daha fazla olduğu görülmektedir.



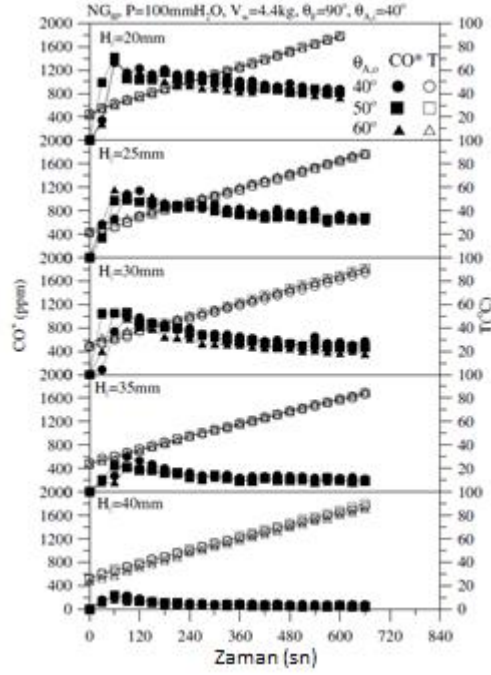
Şekil 3.4 Yüksek kaliteli doğalgazla yapılan ısıtma deneyinde giriş basıncı $P= 100 \text{ mm H}_2\text{O}$ için zamana bağlı CO emisyon ve su sıcaklığı değerleri

Yüksek kaliteli doğalgaz için giriş basıncı ayarı yapıldığında yani basınç $150 \text{ mm H}_2\text{O}$ 'dan $100 \text{ mm H}_2\text{O}$ 'a düşürüldüğünde CO emisyonlarında önemli düşüşler elde edilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.5 Farklı ocak açıklıkları, ön havalandırma, doğalgaz çeşitleri ve giriş basınçları için etkinlik ve CO emisyonları

Farklı doğalgaz çeşitlerinin farklı giriş basınçları için ön havalandırma miktarına göre CO emisyon ve verimleri belirlenmiştir (Şekil 3.5). Havalandırma miktarı arttırıldığında CO emisyonu düşerken verim değişken olmaktadır. Havalandırma miktarı arttırıldığında tam yanma sağlandığı için verim artmaktadır. Verimin, belli bir değerden sonra azalmasının sebebi alev fazla hava karışarak alevin soğumasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle ön havalandırmanın optimum bir değeri vardır.



Şekil 3.6 Farklı tencere yükseklikleri için zamana bağlı etkinlik ve CO emisyon değerleri

Şekil 3.6’da tencere yüksekliğinin CO emisyonu üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Tencere yüksekliği arttığında CO emisyon miktarı azalmakta ve verim artmaktadır. Tencere yüksekliği düşürüldüğünde ise CO emisyon miktarı, soğuk tencere yüzeyine çarpan alevin bölgesel olarak sönmesinden dolayı artmaktadır.

Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar özetle şu şekildedir:

- Doğalgaz düşük kaliteden yüksek kaliteye çevrildiğinde etkinlik azalmakta ve CO emisyon miktarı artmaktadır.
- Bütün doğalgaz çeşitleri için ısıl girdi yani yakıt debisi arttığında etkinlik azalmakta, CO emisyon miktarı artmaktadır.
- Yüksek kaliteli doğal gaz için, ocak açıklığının (θ_f) 60° veya 90° olmasından bağımsız olarak gaz basıncı 150 mm H₂O'dan 100 mm H₂O'a düşürüldüğünde CO emisyon miktarı önemli derecede minimize olmakta ve etkinlik artmaktadır.
- Ön havalandırmanın artması ile CO emisyon miktarı azalırken etkinlik neredeyse değişmemektedir.
- Tencere yüksekliğinin artması ile tencereye değen ateşin soğuyarak sönmesine bağlı olarak CO emisyon miktarı azalmaktadır. Diğer taraftan yüksek tencere yüksekliğinde yanan gazlar hava ile karışıp soğuması sonucunda etkinlik

azalmaktadır. Bu sebeple iki değer için de optimum bir tasarım yaparak standart değerlere çekilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

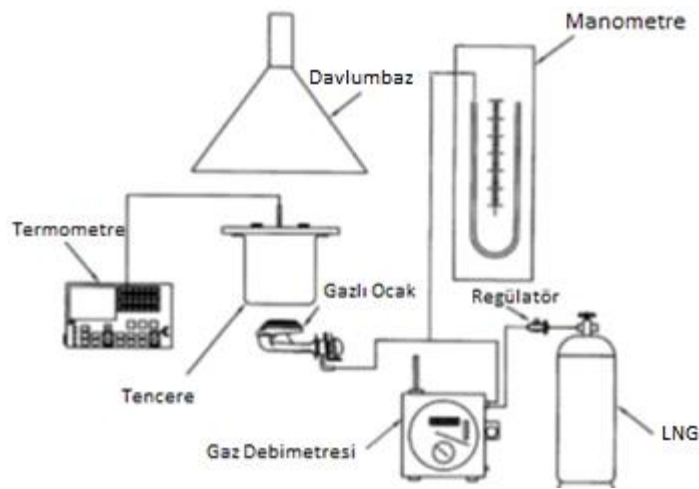
- Yüksek kaliteli doğal gaz kullanarak, düşük kaliteli doğalgaza kıyasla ocak performansı giriş basıncı, ocak açıklığı, ön havalandırma ve tencere yüksekliğinde yapılan ayarlamalarla önemli derecede geliştirilebilmektedir.

Lin, Lee ve Hou tarafından yapılan araştırmada (2007) [8], dönel (swirl) akışlı gazlı yakıcılarda, kap yüksekliği, birincil hava, gaz debisi, gaz basıncı, yarı kapalı yanma alevi gibi parametrelerin ısı verim ve CO emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada, dönel akışlı yakıcı (SB), radyal akışlı yakıcıya (RB) göre daha yüksek verim, CO konsantrasyonu açısından az miktarda fazlalık görülmüştür. Kap yüksekliğinin artmasıyla yüke alev çarpmalarından kaynaklı sönmenin azalmasıyla CO emisyonlarında azalma gözlenmiştir. Kap yüksekliğinin artmasıyla birlikte karışım ve ortam havası kaba temas etmeden önce alev ve yanma gazları daha büyük ölçüde soğumaktadır. Böylelikle ısı transferi için sıcaklık gradyeni düşmekte bu da verimin düşmesine öncülük etmektedir. Isı girişi, verimi azaltmakta ve CO emisyonunu arttırmaktadır. Birincil havadaki artış, CO emisyonunu azaltsa da verimi neredeyse etkilememektedir.

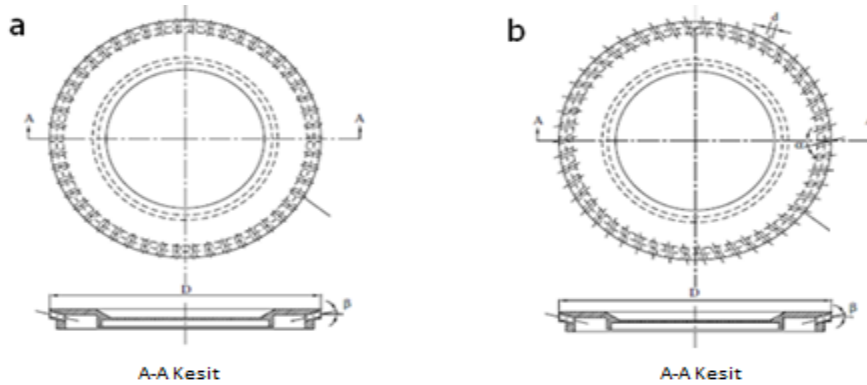
Yıllardır gazlı ocaklardaki yakıcılar için yapılan çalışmalar yüksek ısı verim sağlamak ve düşük emisyon değerlerine ulaşmak amaçlıdır. Araştırmaların çoğu, ısı verimin yüksek kap yüksekliklerinde azaldığını fakat CO emisyonlarının azaldığını göstermektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle ızgara yüksekliği, ısı girişi, port şekli, port boşlukları, kap şekli, kap ölçüleri, kap kütlesi, kap materyali gibi tasarım faktörleri incelenmiştir. Geleneksel gazlı ocakların çoğu Bunsen tip kısmi havalandırılmış tipte, birincil hava girişi yüksek hızlı gaz jetiyle ortam havası arasında momentum korunumu prensibinden sağlanır. Gazlı ocakların mevcut açık alevli tasarımları enerjinin büyük kısmının yanma gazlarıyla kaybolmakta bu yüzden verim düşmektedir. Eğer ki alevin veya yanma gazlarının çevreye saçılımı geciktirilirse verimde artış sağlamaktadır. Dönel akış prosesi, alevin yüzeyde kalma süresini uzatmakta ve akış alanındaki dairesel hareket ile akışın karışımını arttırmaktadır. Yapılan bu çalışmalara rağmen yakıcılarda emisyon miktarını azaltmaya ve enerji verimini arttırmaya yönelik çalışmalar kısıtlıdır. Bu araştırmada, dönel akışın yakıcıların performanslarına etkisi, en uygun tasarım ve uygulama

faktörlerinin etkilerini gözlemlemek amaçlanmıştır. Dönel akışlı yeni dizayn yakıcılarla geleneksel gazlı yakıcıların verimleri ve CO emisyon değerleri karşılaştırılmıştır. Ek olarak da yapılan deneysel çalışmalarla dönel akışa, birincil havalandırma, gaz debisi, kap yüksekliği, basınç gibi parametrelerin etkileri gözlemlenmiştir.

Şekil de gösterilen deney düzeneği, dönme hareketinin gaz emisyonları ve etkinliğe etkisinin incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Deneylerde iki tip ocak kullanılmaktadır. Kullanılan iki ocağında alev çıkış portları yatay düzlem ile $\beta=15^\circ$ açı yapmaktadır. Diğer taraftan, birincisinin alev çıkış portları radyal doğrultu ile açı yapmaz iken, diğeri ise 26° açı yapmaktadır.



Şekil 3.7 Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 3.8 (a) Radyal alevli yakıcının dış halkası (RB) (b) Döner alevli yakıcının dış halkası şematik görünümü

Kullanılan ocaklarda, alev çıkış portlarının açısı dışında kalan diğer parametreler sabit tutulmuştur ve iki ocakta bakırdan üretilmiştir. Yakıtın enjektörden hızla çıkması, karışım odasında negatif basınç oluşturur. Böylelikle birincil hava yakıcının alt

kısından karışım odasına girmektedir. İkincil hava ise alev çevresinden alınmaktadır. Bu sebeple yanmaya giren hava miktarı tam olarak bilinmemektedir.

Deney düzeneğinde kullanılan manometre ile yakıt basıncı ölçülür. Yakıt içinde propan (C_3H_8) %40, bütan (C_4H_{10}) %60 oranlarında bulunmaktadır. Deneylerde yakıtın ısı değeri 106 MJ/m^3 olan LPG kullanılmaktadır.

Deneyde çıkış gazları emisyonları MAX-5, Teledyne Analytical Instruments marka emisyon cihazıyla ölçülmektedir. Çin standartlarına göre olması gereken maksimum CO emisyonu hesabı aşağıdaki gibidir.

$$CO^* = CO_a \times \left[\frac{O_{2t}}{(O_{2t} - O_{2a})} \right] \quad (3.1)$$

Burada CO^* kuru yanma ürünlerindeki teorik CO yoğunluğudur. CO_a ölçülen yoğunluk iken, O_{2t} kuru havadaki teorik oksijen yoğunluğu ve O_{2a} da ölçülen O_2 yoğunluğudur. Termal etkinlik de aşağıdaki formül ile tanımlanır.

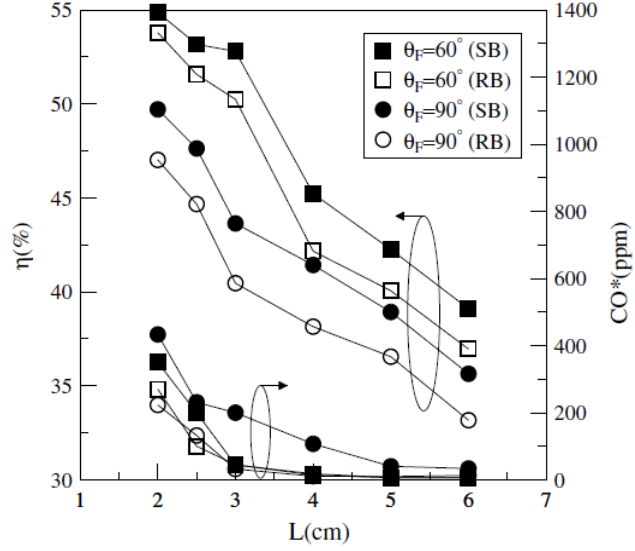
$$\eta = \frac{M \times C_p \times \Delta T}{Q \times H_v} \times 100\% \quad (3.2)$$

θ_f ocağın açıklığı olarak tanımlanmaktadır. $\theta_f=90^\circ$ iken ocak tam açık konumdadır ve gücü 4.41 kW'dır. $\theta_f=60^\circ$ iken ocak yarı açık konumdadır ve gücü 2.82 kW'dır. Bu kavram θ_f (60° ve 90°) pişirmede çok kullanılır. Deneyde kullanılan yakıtın özelliği aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3. 1 Farklı ocak açıklıkları ve giriş basınçları için ısı girdi tablosu

	P=230 mm H ₂ O	P=280 mm H ₂ O	P=330 mm H ₂ O
$\theta_f=60^\circ$	2,57 kW	2,82kW	2,98 kW
$\theta_f=90^\circ$	4,02 kW	4,41 kW	4,81 kW

Dönel alevin ve tencere yüksekliğinin etkilerini görebilmek için θ_f ve tencere yüksekliğinin (L) farklı değerleri için CO ve verim testleri yapılmıştır.



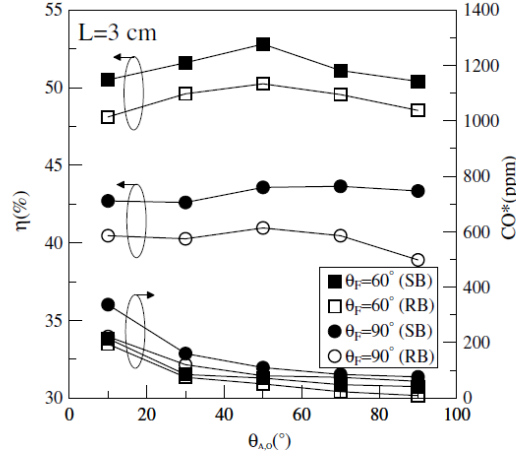
Şekil 3.9 Radyal alevli yakıcıda (RB) ve dönel alevli yakıcıda (SB) çeşitli tencere yükseklikleri ve çeşitli ocak açıklıkları için verim ve CO emisyonu diyagramı

Dönel alevli yakıcılarda verimin artması, ısı taşınım katsayısının ve yanma ürünlerinin tencere alt bölümünde kalma süresinin arttırılması ile gerçekleştirilmiştir.

Dönel alevli yakıcılar, radyal yakıcılara kıyasla fazla CO salmaktadır. Dönel alevli yakıcı portlarının eliptik olmasından dolayı radyal yakıcı portlarına göre alanı daha düşüktür. Bu da ikincil havalandırmanın daha az olmasına sebep olur. Böylelikle alevin çevresinden çektiği hava azalır ve yanma kalitesi düşer. Buna rağmen yakıt-hava karışımının iyi olması, yanma gazlarının tencere altında kaldığı süre ve ısı taşınım katsayısının arttırılması bu etkiyi bastırarak CO emisyonunu iyileştirilmektedir.

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi tencere yüksekliği verimi azaltırken CO emisyon miktarını arttırmaktadır. Diğer taraftan tencere yüksekliğinin azaltılması alevin tencere tabanına çarpmasını arttırır. Bu şekilde alev daha çok soğur. Sonuç olarak tamamlanmamış yanma CO oluşumunu arttırır.

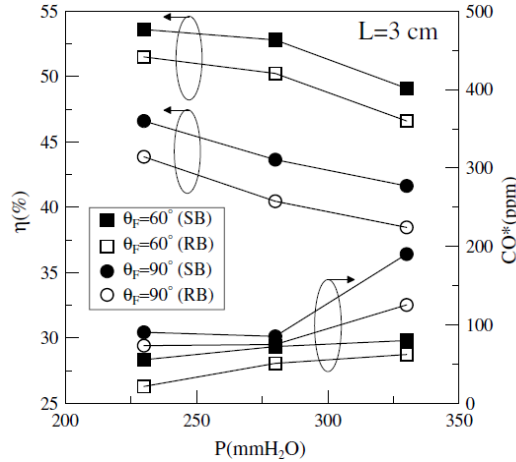
Isıl girdi ve ön havalandırmanın etkileri Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3. 10 Radyal alevli yakıcılarda (RB) ve dönel alevli yakıcılarda (SB) çeşitli ocak açıklıkları için ön havalandırma miktarına göre verim ve CO emisyon diyagramı

Şekil 3.10'da, $\theta_{A,0}$ havalandırma kanalındaki açıklığını belirtir. $\theta_{A,0}=90^\circ$ iken hava kanalı tamamen açıktır, $\theta_{A,0}=10^\circ$ iken kanal minimum açıklıktadır. Şekilde görüldüğü gibi, havalandırma arttığında CO emisyon miktarı düşmektedir. Bunun sebebi tam yanma için gerekli havanın karşılanabilmesidir.

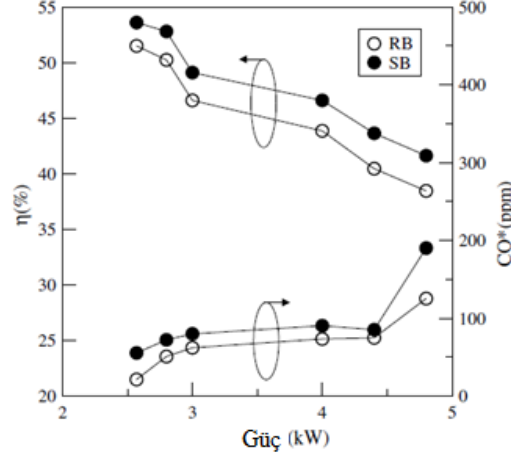
Hava basıncının etkileri Şekil 3.11'de görülmektedir.



Şekil 3. 11 Radyal alevli yakıcılarda (RB) ve dönel alevli yakıcılarda (SB) çeşitli ocak açıklıkları için giriş basıncına göre verim ve CO emisyon diyagramı

Basınç artışı sabit tencere yüksekliğinde alev yüksekliğini ve alevin tencere tabanına çarpma miktarını arttırdığı için, basıncın artması ile CO emisyonu artmıştır. Verim de CO emisyonu ile ters orantılı olarak basınç artışı ile düşmüştür.

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi ısı girdi arttıkça verim düşmekte ve CO emisyonu artmaktadır.



Şekil 3. 12 Radyal alevli ocaklarda ve döner alevli ocaklarda ısı girişiyle etkinlik ve CO emisyonu diyagramı

Bu deneylerin ışığında Lin, Lee ve Hou yaptığı çalışmadan çıkan sonuç şu şekildedir:

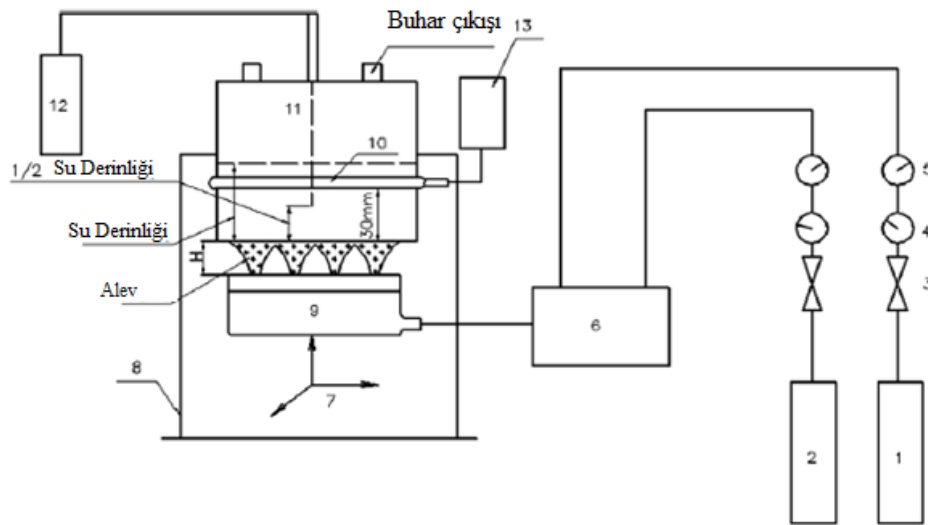
- Dönel alevli yakıcıların verimi radyal alevli yakıcılara göre daha fazladır.
- Tencere yüksekliği arttırıldığında CO emisyonu azalmakta, bunu sebebi de tencere altına alevin çarpması ile bölgesel olarak sönmeler olmasıdır. Tencere yüksekliğinin artması ile yanma sonucu oluşan gazların havaya karışarak soğuması nedeniyle etkinlik azalmaktadır.
- Ön havalandırmanın arttırılması ilk iki tip ocakta da CO emisyonu azalmakta, verim neredeyse değişmemektedir.
- Isıl girdinin artması ile alev yüksekliği artarak tencere tabanına alev çarpması artarak CO emisyonu da artar. Bunun sebebi tencere tabanının alevi soğutarak bölgesel olarak söndürmesidir.

Leung [6] ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ısı verimi arttırmak ve iç hava kirliliğini azaltmak gerekliliği anlatılmış ve deney düzeneğinde ocaklardaki baskın tasarım parametrelerinin etkileri tek başına ve birleştirilmiş şekilde değerlendirilmiştir.

Geleneksel ev tipi ocaklar, düşük basınç ve düşük Reynolds değerlerinde çalışırlar. Bu yakıcıların kullanımında düşük enerji tüketimi ve iç hava kirliliği iki önemli etkidir. Deneysel çalışmada, ön karışimli gaz yakıtlı alev kullanan ocakta 4 etki ve Box-Benken tasarım metodu uygulanmıştır. Yakıcıda Reynolds sayısı, yakıt fazlalık katsayısı, nozulün tencereye mesafesi ve jetten jete boşluk yani ardışık iki port arasındaki mesafe gibi

tasarım parametreleri incelenmiştir. Her bir parametrenin ısı verim ve CO emisyonları üzerindeki etkisinin deneysel sonuçlara bağlı etkileri kaydedilmiştir. Leung ve arkadaşları tarafından yapılan önceki çalışmalarda, ısı geçiş katsayısının, Reynolds sayısına, yakıt fazlalık katsayısına, yakıcı nozülün şekil ve büyüklüğüne, nozül ile yüzey mesafesine, komşu nozüller arasındaki mesafeye ve çarpma yüzeyinin özelliklerine bağlı etkileri çalışılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda, ön karışimli laminar alev jetlerinde ısı transfer oranının, Reynolds sayısı, yakıt fazlalık katsayısı, yakıcı nozül yapısı, nozülün tencereye olan mesafesi, çarpma yüzeyinin özelliklerine bağlı olduğu söylenmiştir. Literatürdeki çalışmalara ek olarak bu çalışmada, verim ve CO emisyonlarına etkisi ve daha önce göz ardı edilen ardışık iki port arasındaki mesafede incelenmiştir. Box-Benken dizayn metodu denilen yöntem ile bu ana parametrelerin birbirlerine olan birleşik etkileri incelenmiştir.

Deneylerde Reynolds numarası 200-500 arasındaki değerlerde incelenmiştir. Geleneksel ocak yakıcısının çapı 160mm ve dairesel portlarının her biri 3mm olarak kullanılmıştır. Dairesel portların yüzey ile yaptığı mesafe 3 ile 21mm arasında değişmektedir. (Dairesel portlardan pişirme kabının alt yüzeyi arasındaki mesafenin dairesel port çapına oranı H/d 'nin 1-7 arasında değişmesine bağlı olarak.) Ardışık iki dairesel port arasındaki mesafenin dairesel port çapına oranı 5,2 ile 15,6 arasında değişmiştir. Yakıtça zengin alevlerin, yakıt fazlalık katsayısı 1,4 , 1,7 ve 2 oranlarında değişmektedir. Deney düzeneği şematik olarak Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3. 13 Şekil Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Yakıcı üzerinde 48 dairesel boşluk bulunmaktadır ancak deneyler sırasında 38'i kapatılmış, 10 u kullanılmıştır. Kullanılan LPG'nin %70'i bütan, %30'u propan gazlarının karışımından oluşmuş, alt ısı değeri 117 MJ/m³tür. Çin standartlarına uygun CO emisyonları dairesel tüplerde ölçümler yapılmıştır. Bu çalışmada ısı verim yakıcıdan tencereye aktarılan ısının yüzdesi olarak tanımlanmıştır. 4kg suyun başlangıç sıcaklığından 50°C sıcaklık artışına kadar geçen sürede harcadığı LPG tüketimi hesaplanarak bulunmuştur. Matematiksel olarak denklem 3.3'te gösterilmiştir.

$$\eta = \frac{M \times C_p \times \Delta T}{Q \times H_v} \times 100\% \quad (3.3)$$

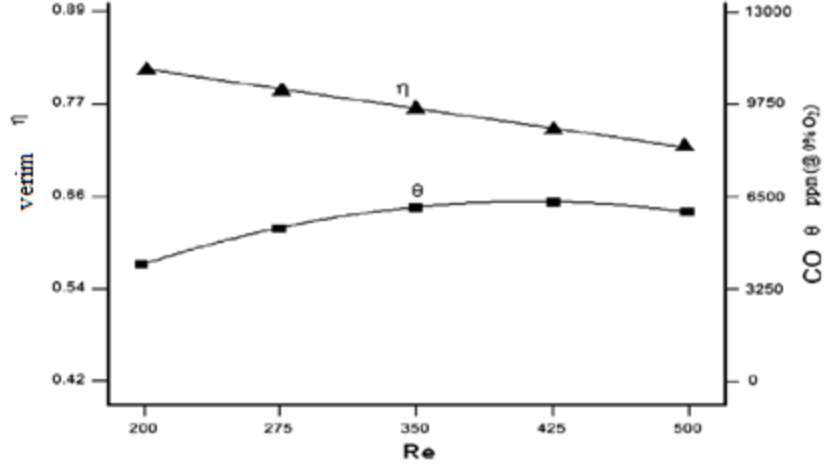
Burada, M=suyun kütlesi kg, cp=suyun özgül ısı kJ/kg°C, Q=tüketilen LPG m³, ΔT=Sıcaklık artışı °C, H_v=LPG'nin ısı değeri'dir. CO emisyon hesabı da aşağıdaki denklem 3.4'e göre yapılmıştır.

$$CO (@ 0\% O_2) = \left[\frac{20,9}{20,9 - \%O_2} \right] \times CO_{ölçülen} \quad (3.4)$$

CO(@ 0 % O₂) O oksijende kuru yanma ürünlerindeki teorik CO yoğunluğudur. CO_{ölçülen} ölçülen CO yoğunluğu iken, O₂ de ölçülen O₂ yoğunluğudur.

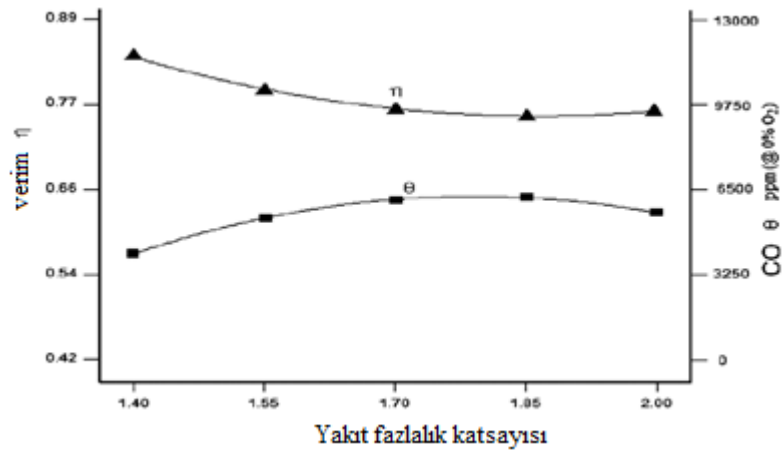
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, ısı verim (η), Reynolds sayısının (Re) artışıyla azalmaktadır. Kwok ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Re ve yakıt fazlalık katsayısı (Φ)'nin artışıyla alevin iç çekirdek bölgesinin uzunluğunun büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bu nedenle Re sayısındaki artarken H/d oranının sabit tutulmasıyla, hava ve LPG'nin tam yanma için gerekli karışım alanına sahip olmamasından dolayı, büyük miktarda gaz yanmaz ve ısı verim (η) düşer.

Şekil 3.14 bize Re sayısının artışıyla verim (η) ve CO emisyonlarındaki (θ) değişimi göstermektedir. CO emisyonları (θ), Re sayısının artmasıyla hafif bir pik yapar ve daha sonra bir nedenden tekrar düşer. Çünkü Re sayısının artmasıyla daha çok hava/LPG karışımı reaksiyon bölgesine doğru akarak yanmaya karışır. Bununla birlikte, yanma için gerekli olan hava sağlanamaz ve CO emisyonlarında (θ) artış olur.



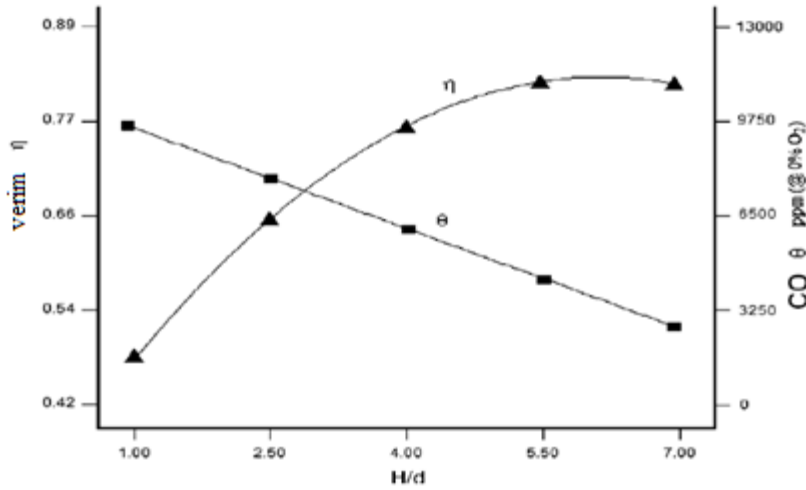
Şekil 3. 14 $\Phi=1,7$, $H/d=4$ ve $S/d=10,4$ değerlerinde η ve θ 'nın farklı Re sayılarında değişiminin grafiği

Yakıt fazlalık katsayısının, verim ve emisyon üzerindeki etkisi Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Isıl verim, yavaşça azalır minimuma ulaşır, yakıt fazlalık katsayısının artmasıyla biraz artarmaktadır. Tersine, CO emisyonları önce artar maksimum ulaştığı noktadan sonra yakıt fazlalık katsayısının artışıyla biraz düşmektedir. Genellikle sitokiyometrik koşullarda, tam yanmanın sağlanmasıyla birlikte yüksek alev sıcaklıklarına ulaşılır. Yakıt fazlalık katsayısının $\Phi=1,4$, yani sitokiyometrik orana yakın olduğu değerde, verim yüksek, CO emisyonları ise düşüktür. Φ 'nin artmasıyla, durma noktasındaki büyük ölçüde yanmamış hava-LPG karışımı artar ve düşük alev sıcaklıklarına neden olur. Sonuç olarak verim düşer, CO emisyonları artar.



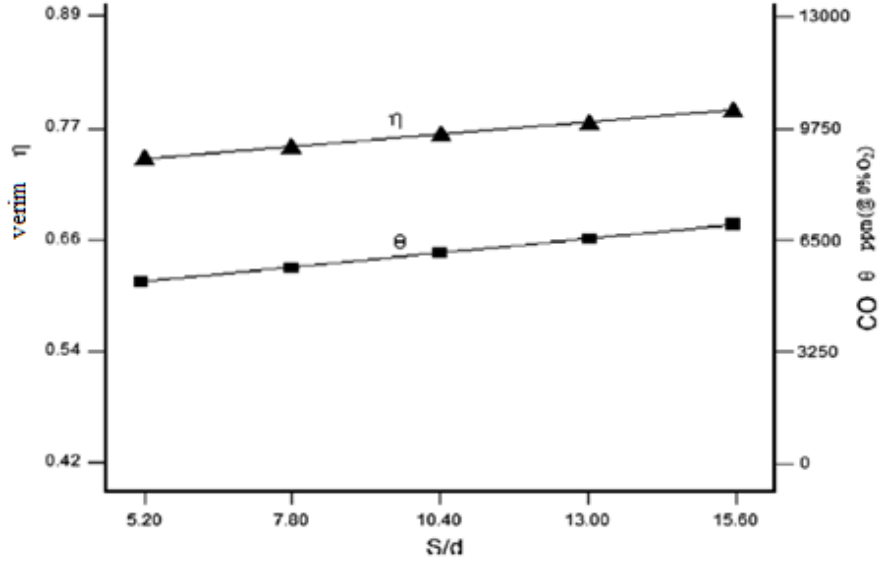
Şekil 3. 15 $Re=350$, $H/d=4$ ve $S/d=10,4$ değerlerinde yakıt fazlalık katsayısının (Φ), η ve θ 'ya etkisinin grafiği

Şekil 3.16'da nozül çapının– nozülün tencereye olan uzaklığı (H/d) arasındaki ilişkinin verim, emisyon ilişkisi gösterilmiştir. Verim H/d ~ 6 olduğu noktada maksimuma ulaşır. Nozül ile tencere arasındaki mesafenin kısa olması sebebiyle tam yanma gerçekleşmeden alev, tencerenin alt yüzeylerine çarpar; bu sebeple de verim düşük olur. Mesafenin artmasıyla kuvvetli yanma bölgeleri oluşur ve tam yanmayla birlikte verim maksimum değere ulaşır. Fakat H/d belirsiz değerlere genişlediğinde alevin sıcak bölgeleri tencere tabanından uzaklaşmış olur ve verim düşmeye başlar. CO emisyonları, H/d oranı arttığında hızla azalır. Yüksek H/d oranında, daha fazla hava reaksiyon bölgesine ulaşır böylelikle hava-LPG daha iyi karışarak, CO emisyonlarının azalmasını sağlar.



Şekil 3. 16 Re=350, $\Phi=1,7$ ve $S/d=10,4$ değerleri için farklı H/d oranının η ve Θ 'ya etkisinin grafiği

Şekil 3.17'de görüldüğü gibi portların arasındaki mesafenin (S/d) artmasıyla artar. Ardışık iki port arasındaki etkileşim, ısı transferini azaltır. Görünen o ki, verim ve S/d arasında lineer ilişki vardır; alevlerin birbirine müdahalesi gitgide azalır ve önemsiz hale gelir. CO emisyonlarının da S/d oranının artmasıyla arttığı Şekil 3.17'de görülmektedir. S/d oranı küçükken, daha fazla çevre havası alıncak ve yanan hava/LPG karışımını arttıracaktır. Bu durum pozitif basıncın varlığından kaynaklanır ve düşük emisyonu sağlar. Aşırı hava girişi alev sıcaklıklarını düşürdüğünden dolayı CO emisyonlarının yükselmesine neden olan sebeplerin başında geliyor olabilir.



Şekil 3. 17 Re=350, H/d=4 ve $\Phi=4$ değerleri için farklı S/d oranının η ve θ 'ya etkisinin grafiği

Leung ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar sonucunda çıkan sonuçlar özetle şu şekildedir:

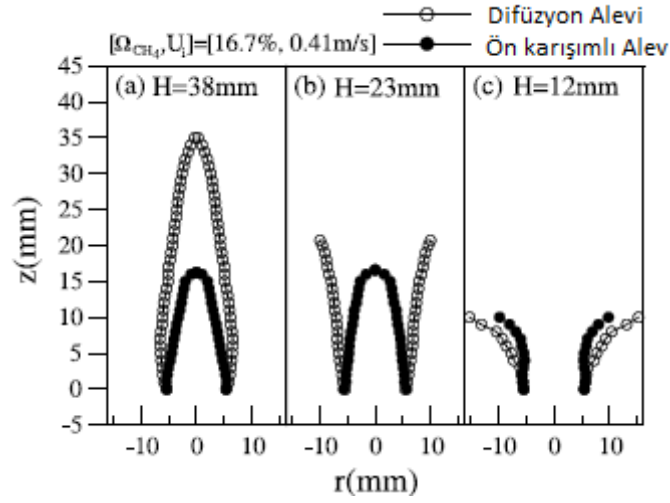
- Reynolds sayısı CO emisyon oranını ve verimi birlikte etkilemiştir. Sabit oranda, pişirici yakıcısının verimi azalmış ve Re sayısı arttığında, CO emisyon oranı öncelikle maksimum noktaya ulaşmış ardından düşmüştür.
- Yakıt fazlalık katsayısının verim ve emisyon üzerindeki etkisi çok büyüktür. Φ arttığında, pişirici yakıcısının verimi minimum değere düşmüştür bir süre sonra hafifçe artmıştır bu sırada CO emisyon oranı yavaşça maksimum değere ulaşmış, sonra düşmüştür.
- Pişirici yakıcısının verimi, H/d yükseldiğinde ilk önce maksimum değere ulaşmış, daha sonra düşmüştür. Bununla birlikte CO emisyonu, sabit oranda düşer.
- İki port arasındaki mesafenin artmasıyla, pişirici yakıcısının verimi CO emisyonları birlikte artar.
- Geliştirilmiş ikinci dereceden regresyon modelleriyle bağımsız faktörlerin birleştirilmiş etkisi araştırılmıştır. Pişiri yakıcısının verim modeli için, Φ , H/d ve S/d'nin birleşik etkisi hesaba katılmalıdır. CO emisyon modeli için ise Re, Φ ve S/d'nin birleştirilmiş etkisi daha önemli olacaktır.

Hou ve Ko'nun (2003) yaptığı çalışmada [10], geleneksel ev tipi ocaklardaki alev karakteristiklerinin ısıtma yüksekliğine etkisini görüp, incelemek amaçlanmıştır. Ev tipi yakıcılarda enjektörler genellikle laminar alevlidir. Buna rağmen literatürde yanma karakteristikleri ve ısı verim üzerine etkileri sınırlıdır. Isıtma yüksekliği bu tip yakıcılar için en önemli parametre olmasına rağmen literatürde üzerinde yeteri kadar durulmamış bir konudur. Bu çalışmayla ısıtma yüksekliğinin etkileri incelenerek literatüre katkı sağlamak istenmiştir. Düşük Reynolds sayılı zengin yakıt-hava karışımının tencere yüzeyinin normaline çarpması durumlarında, ısıtma yüksekliğinin alev yapısının, sıcaklık dağılımının, ısı verime etkisinin üzerinde durulmuştur. Sonuç olarak alev yapısının, sıcaklık dağılımının ve ısı verimin ısıtma yüksekliğinden etkilendiğini görülmüştür. Yüksekliğin artmasıyla ısı verim öncelikle yükselmiş, maksimum değere ulaşmış ve ardından düşmüştür. Optimum ısıtma yüksekliği, yüksek sıcaklıktaki geniş alev bölgeleriyle tanımlanmıştır. Ayrıca, optimum ısıtma yüksekliğinin metan konsantrasyonun veya enjektör hızının yükselmesiyle arttığı bulunmuştur. Isıtma yüksekliğinin, zengin ön karışimli alevin ucundan çok az miktarda aşağıda olduğu durumlarda maksimum ısı verime ulaşılır. Ev tipi gazlı ocakların tasarımında bu parametrelerin uygulanması önemlidir.

Bu çalışmada, tek bir alevin ısıtma yüksekliği üzerinden fazla ocakların yanma optimizasyonu analiz edilmiştir. Deneysel çalışmada, çift alevli yakıtça zengin Bunsen alevleri kullanılmıştır. Eysel yakıcılarda ısıtma yüksekliğinin, düşük Re sayılarındaki alevlere etkisi gözlenmek istenmiştir. Sitokiyometrik orandaki alevler yerine yakıtça zengin Bunsen alevleri tercih edilmiş, yakıt olarak da doğal gaz kullanılmıştır. Isıtma yüksekliği 4-60 mm ($d =$ iç çap olmak üzere $H/d = 0,44-6,67$), 3 farklı enjektör hızı ($U_i = 0,45- 0,675- 0,9$ m/s ve sırayla bu hızlara karşılık gelen $Re = 400-600-800$), 3 farklı metan konsantrasyon ($\Omega_{CH_4} = \%13-\%15-\%17$ ve sırayla yakıt fazlalık katsayıları $\Phi = 1,4-1,7-2,0$) kullanılmış ve Reynolds sayısı ve hava fazlalık katsayısının etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla parametrelerin etkileri özetlenmiştir.

0,41 m/s enjektör çıkış hızı ve $\Omega_{CH_4} = \%13$ metan konsantrasyonuna karşılık gelen $Re = 365$ ve $\Phi = 1,9$ yakıt fazlalık katsayısı için 3 farklı ısıtma yüksekliğinde 3 farklı alev yapısı oluşmuş ve şekilde gösterilmiştir. A tipi alev 38 mm ısıtma yüksekliğinde, konik biçimli iç ön karışimli yakıtça zengin alevden ve konik biçimli dış difüzyon alevinden

oluşmaktadır. Bu tipte dış difüzyon alevinin ucu, duraklama yüzeyine temas etmektedir. İkinci alev tipi olan B, 23mm yükseklikte oluşmuştur. İç alev ön karışimli ve yakıtça zengindir. Dış difüzyon alevi ise, trompet şeklindedir. B tipi iç alev A tipine göre duvar etkisinden dolayı daha geniş fakat kısadır. C tipi alev ise düşük ısıtma yüksekliğinde meydana gelir. Hem iç ön karışimli alev, hem dış difüzyon alevi durma yüzeyinden dolayı trompet şeklindedir. Isıtma yüksekliği alev yapısını etkileyen önemli bir parametredir.

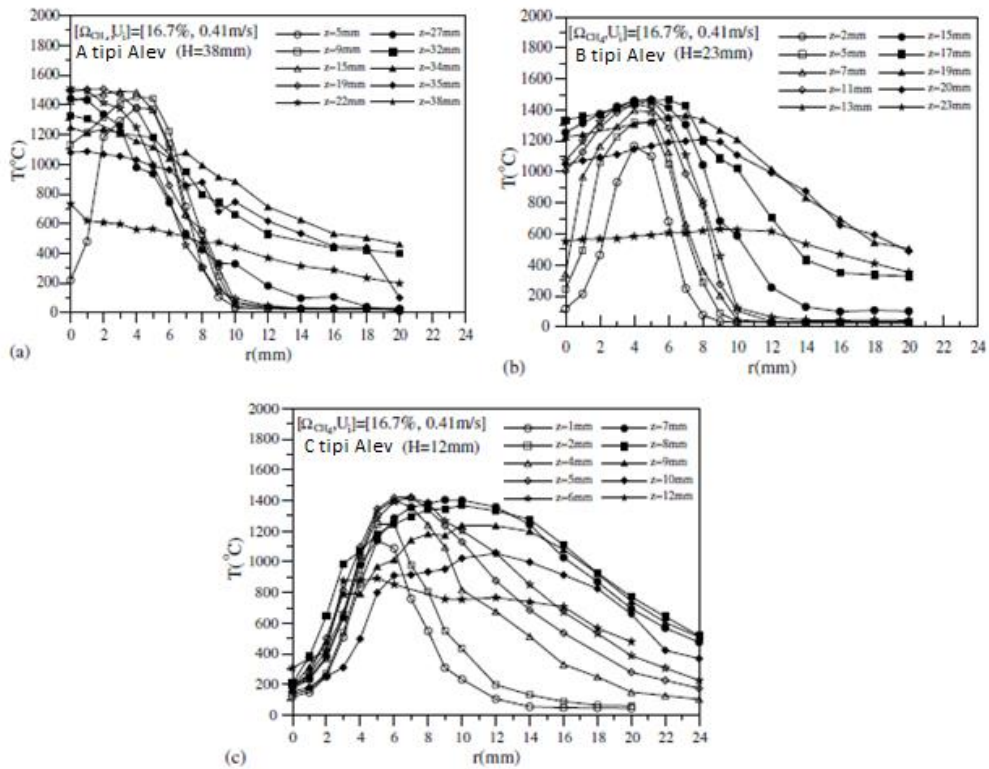


Şekil 3.18 A-B-C tipi alevlerin görünümü

0,41m/s enjektör çıkış hızı ve $\Omega_{CH_4} = \%16,7$ metan konsantrasyonunda 3 farklı alev tipi için sıcaklık dağılımları Şekil 3.19'da gösterilmiştir, z düşey, r ise yatay eksenidir. Şekil 3.19. a'da A tipi alev için sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Z=5-9-15mm için sıcaklıklar iç ön karışimli reaksiyon bölgesinin sıcaklıklarıdır. En yüksek sıcaklıklar iç ön karışimli alev ile dış difüzyon alevleri arasında oluşmuştur. Dış difüzyon alevi bölgesinde çevre sıcaklığından etkilendiği için sıcaklıklar hızla düşmektedir.

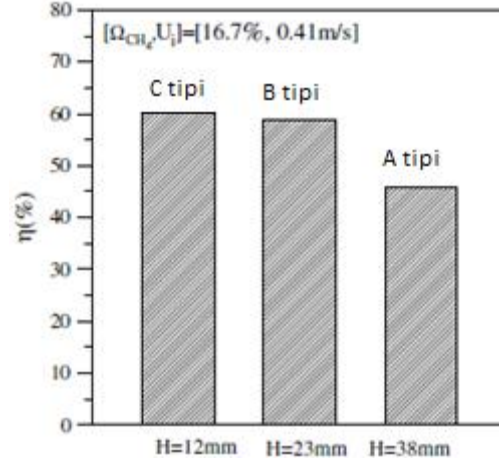
Şekil 3.19 b'de B tipi alev için iç ön karışimli alev iç sıcaklıklar A tipi alev ile benzerdir. Yatayda orijine olan uzaklık arttıkça, sırasıyla yukarı akışlı yanmamış düşük sıcaklık bölgesi, ön ısıtılmalı bölge, yüksek sıcaklık bölgesindeki maksimum sıcaklık ve gitgide sıcaklığı azalan ters akım bölgesi gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık bölgeleri (z=15-19mm olduğu bölgede) yakıtça zengin ön karışimli iç bölge ile ön karışimsız trompet şeklindeki reaksiyon bölgesinde gerçekleşmektedir.

Şekil 3.19 c’de diğer alev tiplerine göre farklı kesitteki C tipi alevin sıcaklık dağılımı görülmektedir. Merkezde yanmamış gazların bulunduğu kor bölgesinin soğuk olduğu görülmüştür. $z=7\text{mm}$ ’de maksimum sıcaklıklar yaklaşık $1400\text{ }^\circ\text{C}$ ’lerdedir ve iç ön karışimli alev ile dış difüzyon alevi arasında geniş bir bölgede yüksek sıcaklık bölgesi oluşmuştur. Ölçümler sonrasında sıcaklık alanının alev yapısından büyük ölçüde etkilendiği, 3 alev için de maksimum sıcaklık noktalarının neredeyse aynı olduğu fakat C tipi alevin en geniş yüksek sıcaklık bölgesine sahip olduğu sonuçları çıkartılmıştır.



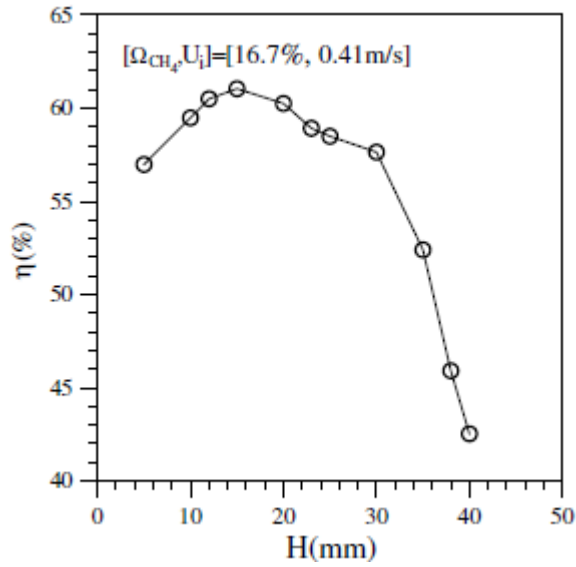
Şekil 3. 19 A-B-C tip alevlerin alev boyları-sıcaklık grafiği

3 farklı tip alevin duvar yüzeyindeki sıcaklıklarının dairesel kesitteki dağılımına bakılmıştır. Laminar akışlı alevler için, iç reaksiyon bölgesi yakıt-hava karışım prosesinin ilerlemesine ve ortam havasının girişine engel oluşturmaktadır. Reaksiyona girmeyen düşük sıcaklıktaki gazlar, duraklama noktasında düşük ısı akısının olmasına neden olmaktadır. Böylece duraklama noktasının, düşük sıcaklıktaki reaksiyona girmemiş yakıt-hava karışımına direk maruz kalmasından dolayı verimde düşüş meydana gelmiştir. C tipi alevde merkezde soğuk bölge olmasına rağmen, en yüksek verime sahiptir.



Şekil 3. 20 A, B ve C tipi alevlerin $\Omega_{CH_4}=16,7\%$ ve $U_i=0,41\text{m/s}$ için ısı verim grafiği

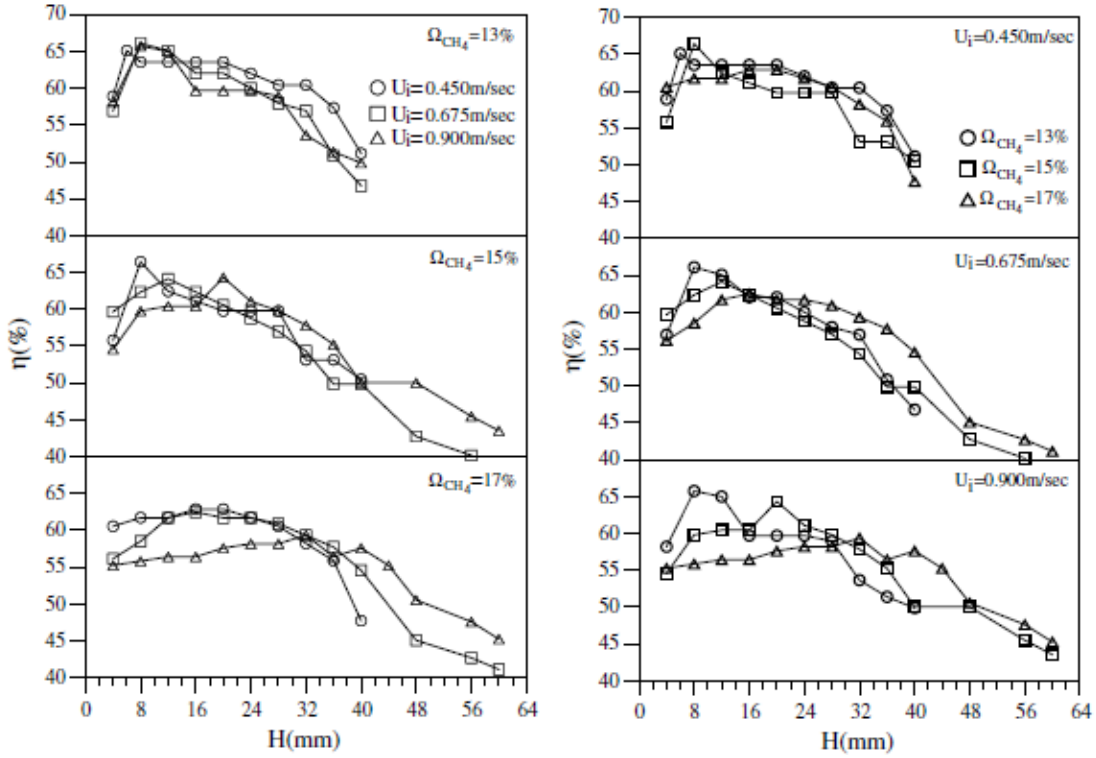
Yüksek ısıtma sıcaklıklarında alev ve akışkan gazlar rahatlıkla çevreki hava ile karışır ve yüzeye çarpmadan önce soğurlar bu sebeple de ısı transferi azalır. Çok düşük ısıtma sıcaklıklarında ise geniş merkezi soğuk kor bölge oluşur. Böylece de düşük sıcaklıktaki reaksiyona girmemiş yakıt hava karışımı yüzey aleve maruz kalır ve ısı verim düşer. $\Omega_{CH_4}=16,7\%$ ve $U_i=0,41\text{m/s}$ olduğu durumda ısıtma yüksekliği arttıkça verimin düştüğü Şekil 3.21’de görülmüştür.



Şekil 3. 21 $\Omega_{CH_4}=16,7\%$ ve $U_i=0,41\text{m/s}$ için ısıtma yüksekliğinin ısı verime etkisi grafiği

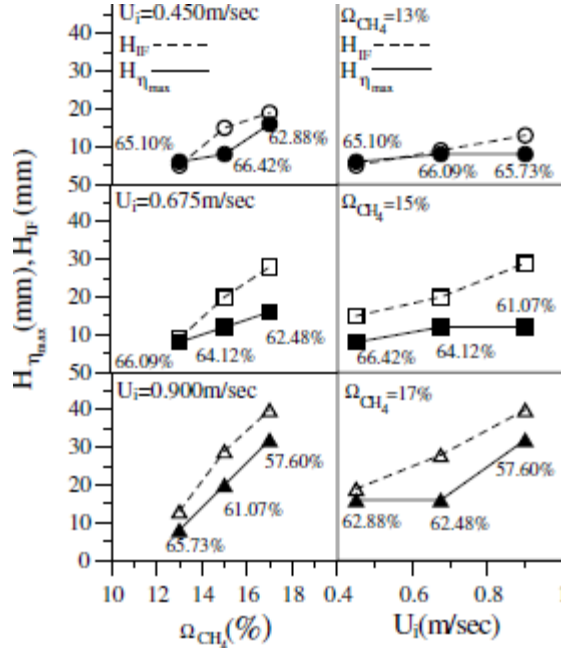
Farklı metan konsantrasyonları ($\Omega_{CH_4}=13-15-17\%$ konsantrasyonlarındaki yakıt fazlalık katsayısı $\Phi=1,4-1,7-2,0$) ve ısıtma yükseklikleri için, enjektör hızlarının ($U_i=0,45-0,675-0,9\text{ m/s}$ hızlarındaki Reynolds sayısı $Re=400,600,800$) ısı verime olan etkileri incelenmiş, Şekil 22’de gösterilmiştir. ısıtma yüksekliğinin $H=4\text{ mm}$ ’den yüksek

değerleri için ısı verim önce maksimum seviyeye yükselmiş ardından düşmüştür. İç bölgedeki zengin ön karışimli alevin yanma şiddeti, karışımdaki metan konsantrasyonu arttıkça düşmektedir.



Şekil 3. 22 Farklı enjektör hızları ve metan konsantrasyonları için ısıtma yüksekliğinin verime etkisi

Metan konsantrasyonu ve enjektör hızının fonksiyonu olarak belirlenmiş maksimum ısı verimindeki ($H_{\eta_{max}}$) ısıtma yüksekliği ve iç bölgedeki zengin ön karışimli alev uzunluğu (H_{IF}) Şekil X'te gösterilmiştir. Açık renkli sembol iç bölgedeki zengin ön karışimli alev ucunu gösterirken, koyu renkli sembol ise maksimum ısı verimin meydana geldiği noktadaki ısıtma yüksekliğini göstermektedir. Sabit metan konsantrasyonunda enjektör hızı arttığında $H_{\eta_{max}}$, H_{IF} artar aynı şekilde sabit enjektör hızında metan konsantrasyonu arttığında, $H_{\eta_{max}}$, H_{IF} artmaktadır. ısıtma yüksekliği, iç bölgedeki zengin ön karışimli alevin ucundan düşük olduğunda maksimum verim meydana gelmektedir.



Şekil 3.23 Farklı enjektör hızları ve metan konsantrasyonları için $H_{\eta_{max}}$ ve H_{1F} değerleri

Hou ve Ku'nun yaptığı çalışmadan çıkarılacak sonuçlar özetle şu şekildedir:

Aynı enjektör hızları ve metan konsantrasyonlarında, 3 farklı tip ısıtma yüksekliklerinde maksimum sıcaklıkların aynı olduğu ancak en düşük ısıtma yüksekliğinde maksimum sıcaklık bölgesinin daha fazla olduğu görülmüştür.

Çok düşük ısıtma yüksekliklerinde yakıt hava ile yeteri kadar temas edemediği için soğuk bölge oluşmakta ve verim düşmektedir. Yüksek ısıtma yüksekliklerinde ise yakıt hava karışımı sağlanmakta ancak alev yüzeye ulaşmadan soğuduğu için verim düşmektedir.

Sabit metan konsantrasyonunda enjektör hızı arttığında maksimum verimdeki alev $H_{\eta_{max}}$, H_{1F} artar aynı şekilde sabit enjektör hızında metan konsantrasyonu arttığında, $H_{\eta_{max}}$, H_{1F} artmaktadır.

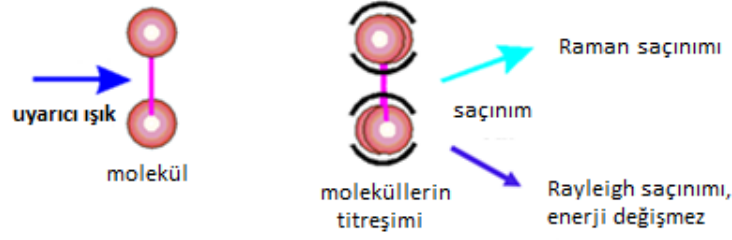
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 RAYLEIGH DENEYLERİ

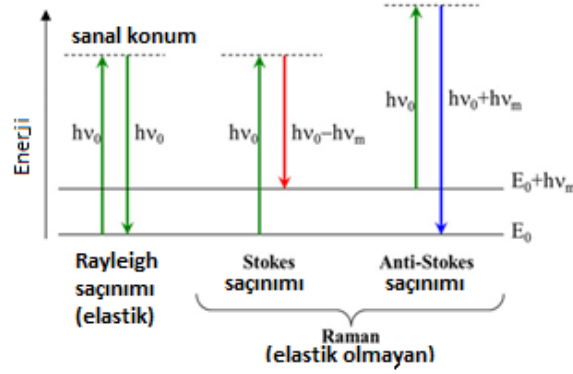
4.1.1 Lazerli Ölçüm Teknikleri

Lazer spektroskopisi, lazerlerin 1960'lı yıllarda ilk gelişimleriyle birlikte, fizik, kimya, biyoloji ve tıp alanlarındaki araştırmalarda önemli bir araç haline gelmiştir. Sıcaklık dağılımı, reaktif veya reaktif olmayan gaz akışlı sistemleri tanımlamada büyük rol oynamaktadır. Akışkanlar mekaniği araştırmalarında lazer teknolojilerinin kullanılmasıyla, basınç, sıcaklık, bileşenlerin oranı, akışkan hızları ve türbülans gibi özelliklerin uzaktan ölçümleri yapılmaktadır. Lazer ile temassız sıcaklık ölçüm teknikleri, son yıllarda yanma uygulamalarında sık kullanılan ve gelişmekte olan teknolojilerdir. Bu tekniklerden başlıcaları: Laser Rayleigh Scattering (LRS), PIV (Particle Image Velocimetry), LDA (Laser Doppler Anemometry), Laser Raman Scattering, Laser-Induced Fluorescence (LIF)'dir. Bu teknikler arasından Laser Rayleigh Scattering (LRS), özellikle türbülanslı yanma uygulamalarında ilgi görmüştür.

Moleküler düzeyde gerçekleşen saçınımlar Rayleigh ve Raman saçınımları olarak adlandırılır. Rayleigh saçınımları, moleküllerden ışığın elastik saçınımları, Raman ise elastik olmayan saçınımlarıdır. Partikül boyutundaki saçınımlar ise Mie saçınımları olarak adlandırılır ve PIV uygulamalarında kullanılır.



Şekil 4. 1 Moleküllere etki eden Rayleigh-Raman saçınımları



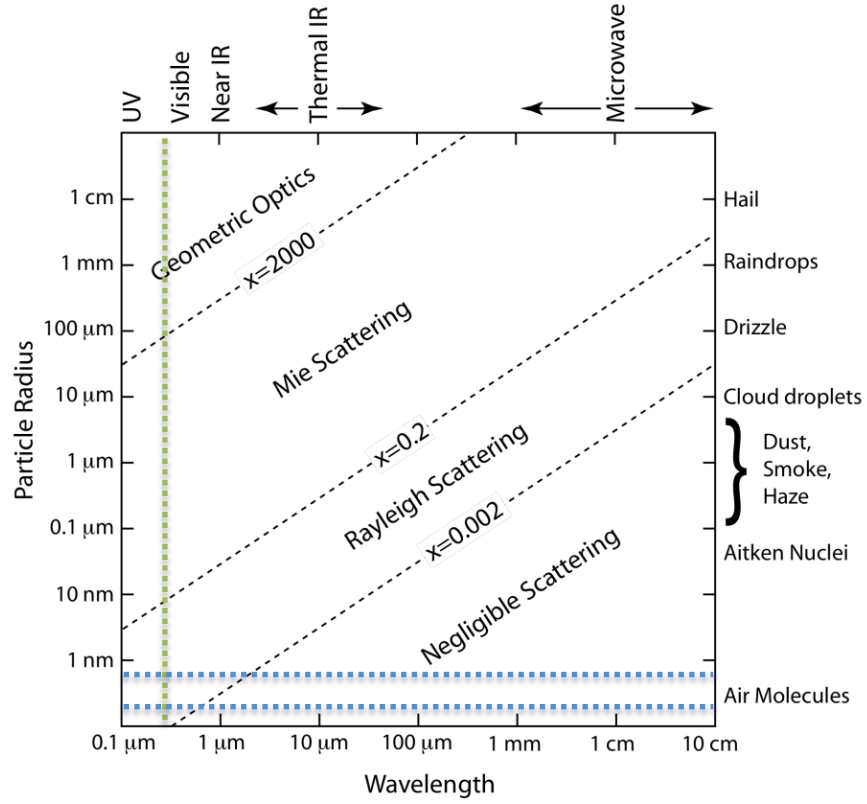
Şekil 4. 2 Rayleigh-Raman saçınımlarının enerji seviyeleri

LRS tekniği öncelikle saçılan ışığın şiddetini görüntüleyerek gaz karışımının yoğunluğunu ölçmektedir. Rayleigh saçınımları moleküler düzeydeki ışık saçınım tekniklerinin en güçlüsüdür ve düşük gaz yoğunluğundaki ölçümler için uygundur.

Termometre, sıcaklıkla yoğunluğun değişimi (Rayleigh saçınımı ve Raman saçınımı için) veya atomik veya moleküler problemlerde dönme, titreşim kaynaklı veya elektron yörüngelerindeki hareketlerin sıcaklıkla değişimi (Raman saçınımı veya LIF için) prensibiyle çalışmaktadır.

Rayleigh saçınımlarının türbülanslı yanma reaksiyonları için birçok kullanım alanı vardır. LRS, sıcak veya soğuk jetler, pistonlu motorlar, kapalı kaplar ve sınır tabaka gibi alanlarda konsantrasyon, yoğunluk, sıcaklık ve alev kalınlığı hakkında bilgi sağlamada büyük rol oynamaktadır. Fakat bu teknikte, Rayleigh saçınımları ile arka plandaki yansımalar arasında spektral bir farklılık yoktur. Geometrik saçınımlar (Arka planda katı yüzeylerden yansıyan ışık), Mie saçınımları ve kimyasal parlamaların olması kaydedilen datada gürültüye neden olduğundan yanma uygulamalarında LRS ölçümleri yapılmasına engel teşkil etmektedir. Mie saçınımlarının yansıtıcılıkları, Rayleigh'e göre 10-20 kat daha güçlüdür. Ölçüm yapılan alanda, Mie saçınımı yapabilecek is, su buharı ve yanma atıkları gibi partiküllerden arındırılması gerekmektedir. Genellikle yanma

sistemlerinin kirli akışlar olmasından dolayı, bu tip lazer ölçüm uygulamalarını zorlaştırmaktadır.



Şekil 4. 3 Partiküllerin büyüklüklerine göre farklı dalga boylarında yaptıkları saçınım grafiği

Şekil 4.3 'teki grafikte, hava molekülleri, toz, is, duman, çise, yağmur damlacıkları, dolu gibi partiküllerin büyüklükleri ve bu partiküllerin farklı dalga boylarında yaptıkları saçınımlar gösterilmiştir. Hava molekülleri, 532 nm dalga boyundaki uyarıcı ışıkta, Rayleigh saçınımları; toz, is, duman gibi partiküller ise daha çok Mie saçınımları yapmaktadırlar [11].

4.1.2 Moleküllerin Rayleigh Saçınımları ile İlgili Temel Prensipler

Rayleigh saçınımları, diğer optik sıcaklık ölçüm tekniklerinden Raman'a göre daha yüksek, LIF'e göre daha düşük güçte sinyal üretmektedir. Bu sinyaller, lokal gaz kompozisyonu ve buna bağlı olarak da moleküllerin lokal efektif Rayleigh saçınım karakteristiklerinin (Rayleigh cross-section) bilinmesiyle sıcaklığın belirlenmesinde kullanılmaktadır.

4.1.2.1 Moleküllerin Rayleigh Saçınım Karakteristiği (Rayleigh scattering cross-section)

Sıcaklığın artmasıyla, moleküller içerisindeki dönme hareketleri ve titreşim hareketleri artar, böylelikle de moleküllerin hacmi büyümektedir. Rayleigh saçınım karakteristiği, moleküllerin hacminin karesiyle orantılı olduğu varsayılarak elde edilen sıcaklığın fonksiyonudur. Gaz karışımları için, her bir bağımsız molekülün Rayleigh saçınımı ışık şiddeti eklenerek karışımların saçınım karakteristiği tanımlanmaktadır.

4.1.2.2 Rayleigh saçınım ışık şiddeti

LRS sisteminin temel prensibi, lazer tarafından uyarılan gaz moleküllerinin enerji seviyelerindeki elastik değişim sonucu ışıma yapmalarıdır. Saçınan ışığın şiddeti, genellikle lazer gücü, gaz yoğunluğu ve gazın saçınım karakteristiğine bağlıdır. Çok bileşenli gaz için, toplam sinyal her bir gazın katkısından bağımsız, sadece her bir bileşenin kısmi basınç (yoğunluk ve konsantrasyon) ve saçınım karakteristiğine bağlıdır.

4.1.2.3 Konsantrasyon ölçümü

Rayleigh sinyallerinden konsantrasyon bilgisi elde etmek için sıcaklık ve basıncın bilinmesi gerekmektedir. Sıcaklık ve basıncın bilinmesiyle, bunlara bağlı saçınım değişiklikleri elemine edilerek karışım içerisindeki her bileşenin mol oranı Rayleigh saçınan ışık şiddetinin ölçülmesiyle belirlenmektedir. Genellikle basınç, basınç transdüserlerin kullanılmasıyla kolaylıkla ölçülür.

4.1.3 Rayleigh Termometresi

Rayleigh Termometresi, alev veya gaz içerisindeki moleküllerin Rayleigh saçınımına dayanarak sıcaklık dağılımını belirlemeyi amaçlar. Rayleigh saçınımları, Mie saçınımına göre daha zayıf saçınımlardır ve belirlenebilmesi için genellikle yükseltici kamera gereklidir. Rayleigh Termometresi ışığın, gaz içerisindeki moleküllerden saçınımına bağlıdır. Burada yoğunluk (molekül/m³) temel faktördür. Genellikle gaz, yükselen sıcaklıkla birlikte genişleyecektir, böylece ışık saçınımlarının şiddeti azalacaktır. Bilinen sıcaklıkta saçılan ışığın şiddetini ölçme ve şiddetin değişikliklerini izleme bize sıcaklıktaki değişimleri belirlememize izin vermektedir. Saçınım şiddeti

mutlaka sıcaklık dışında birçok şeyden (lazer dalga boyu, saçınım açısı ve daha fazlası) etkilenmektedir. Genellikle Rayleigh Termometresi bu etkilerin sabit olduğu veya sabit olduğu varsayılan durumlarda uygulanmaktadır.

Aşağıdaki ifade (4.1) her zaman sabit olduğu varsayılmayacak bazı parametrelerin tepkisi olarak tanımlanmaktadır.

$$\frac{I.T}{\sigma.p.E} = Sabit \leftrightarrow T_{ölçüm} = T_{referans} \cdot \frac{I_{referans}}{I_{ölçüm}} \cdot \frac{(\sigma.p.E)_{ölçüm}}{(\sigma.p.E)_{referans}} \quad (4.1)$$

Ölçüm alt indisi, ölçüm yapılan görüntü, referans alt indisi ise $T_{referans}$ sıcaklığının değişmesi beklenen tüm parametrelerin bilindiği referans görüntüdür. Diğer semboller ise:

Çizelge 4. 1 Sembollerin açıklamaları

Sembol	Tanım	Birim	Açıklama
I	(Gri tonlama) Şiddet	-	Tüm piksellerin ham ölçümleridir.
T	(Mutlak) Sıcaklık	K	Tüm pikseller için beklenen sonuçtur.
σ	Saçınım Karakteristiği		N_2 'ye bağlıdır. Referans ve ölçüm arasında değişebilir fakat her görüntüde sabit kalır.
ρ	(Mutlak) Basınç	Pa	Referans ve ölçüm arasında değişebilir fakat her görüntüde sabit kalır.
E	(Lazer atışı) Enerji	mJ	Yere göre dağılımı değişebilir.

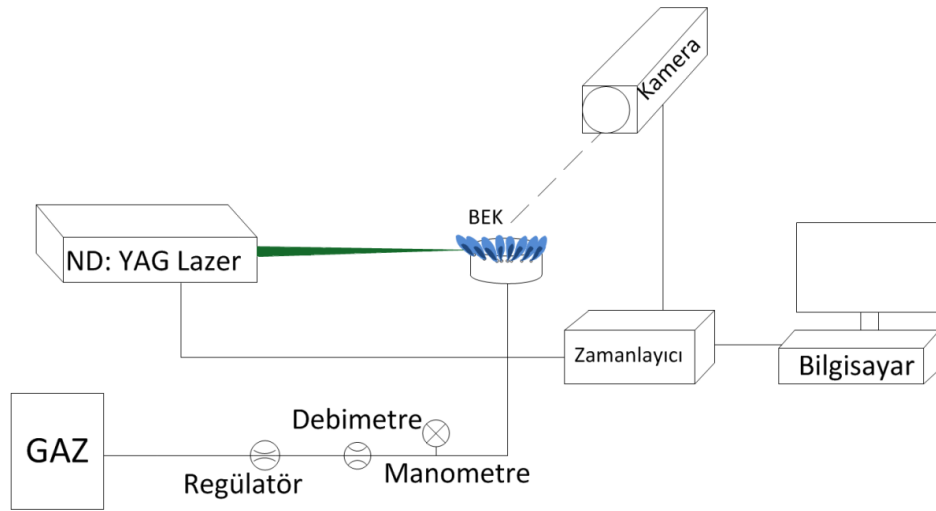
Uygulamada ortamdaki partiküllerden olan saçınımlar etkilenmediği takdirde, referans ve ölçüm görüntülerinde parlak noktalar oluşmaz. Arka plan kirliliği veya ortamdaki toz partiküllerinden oluşan Mie saçınımları olmak üzere 2 çeşit önemli sorun oluşmaktadır. Arka plandaki kirliliğin ışık şiddetinin ölçüldüğü varsayılarak Rayleigh denklemi tekrar yazılabilir.

$$T_{ölçüm} = T_{referans} \cdot \frac{(I-I_{arka\ plan})_{referans}}{(I-I_{arkaplan})_{ölçüm}} \cdot \frac{(\sigma.p.E)_{ölçüm}}{(\sigma.p.E)_{referans}} \quad (4.2)$$

Bu yöntemle yalnızca arka plandaki kirlilik önlenirken, Mie saçınımlarından kaynaklı kirlilik ise, ölçüm sisteminin yazılımında bulunan görüntü işleme yöntemi ile giderilebilir [12].

4.1.3.1 Rayleigh Termometresi Bileşenleri ve Kullanımı

Rayleigh termometresi sisteminde lazer, kamera, optik filtre (yeşil), sinyal yükseltici, zamanlayıcı ve gerekli yazılıma sahip bilgisayar bulunmaktadır. Kamera önüne yerleştirilen yeşil filtre, lazerin gönderdiği ışıktan farklı dalga boylarındaki ışığın kameraya ulaşmasını engellemektedir. LRS tekniğinde anlatıldığı gibi lazer, ölçüm yapılacak yanma bölgesindeki moleküllere uyarıcı ışık göndermektedir. Moleküllerin aldıkları enerjiyle yaptıkları elastik saçınımlar daha önce anlatıldığı gibi zayıftırlar. Bu zayıf saçılımların ışık şiddetlerini yüksek çözünürlüklü kameranın görüntü algılayabilmesi için, sinyal yükseltici kullanılmaktadır. Lazer, kamera ve sinyal yükselticinin ölçüm alınacağı sürede eş zamanlı çalışabilmelerini sağlamak için ise zamanlayıcı bulunmaktadır. Lazerin gücü, sinyal yükselticinin şiddeti istenildiği şekilde ayarlanmaktadır. Öncelikle kalibrasyon için kullanılacak özellikleri bilinen karışım örneğin oda sıcaklığındaki standart hava için görüntü alınır ve kalibrasyon datası olarak kaydedilir. Daha sonra sıcaklığını ölçmek istediğimiz karışımın görüntüsü alınır ve ölçüm datası olarak kaydedilir. Bilgisayar üzerindeki yazılım görüntü analiz yöntemiyle dataları işleyerek sıcaklık değerlerini vermektedir.



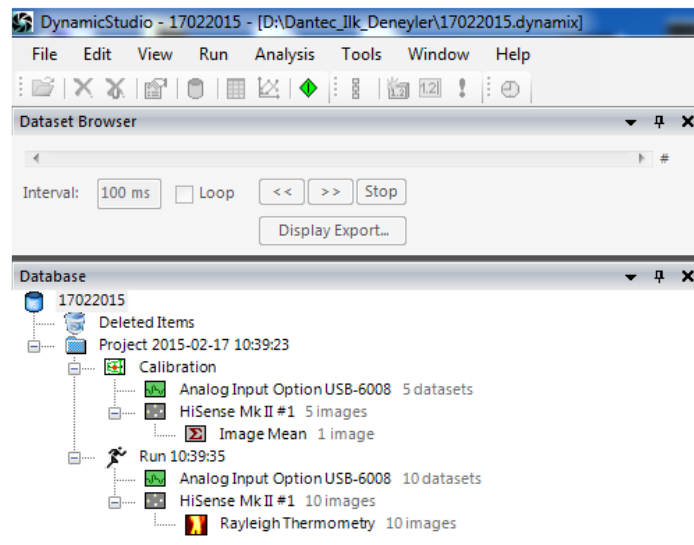
Şekil 4. 4 Rayleigh sisteminin şematik görünümü

4.1.3.2 Rayleigh Termometresi Görüntü Analizi

Sistemde bulunan kamera ve lazer birbirine 90° açılı olacak şekilde yerleştirilmektedir. Rayleigh termometresi ile sıcaklık sonucu alabilmek için Şekil 4.4'te olduğu gibi 2 farklı görüntü gerekmektedir. Bunlardan ilki kalibrasyon için kullanılacak olan yanmanın olmadığı referans görüntü, diğeri ise yanma sırasında alınan ölçüm görüntüsüdür. Şekil 4.5 b'de görülen parlak noktalar, Mie saçınımları yapan toz parçacıklarıdır. Alevin olduğu bölge içerisinde toz parçacıkları görülmediğinden ölçüm yapılan bölge Mie saçınımlarından etkilenmez.

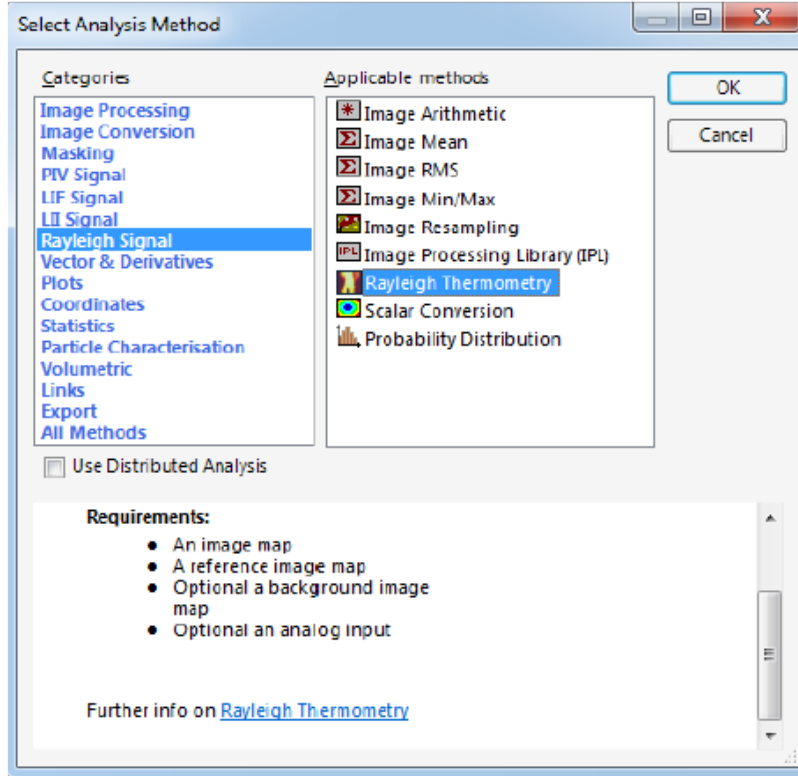


Şekil 4. 5 a) Kalibrasyon görüntüsü b) Ölçüm görüntüsü



Şekil 4. 6 Yazılımın ölçüm kayıt ekranı

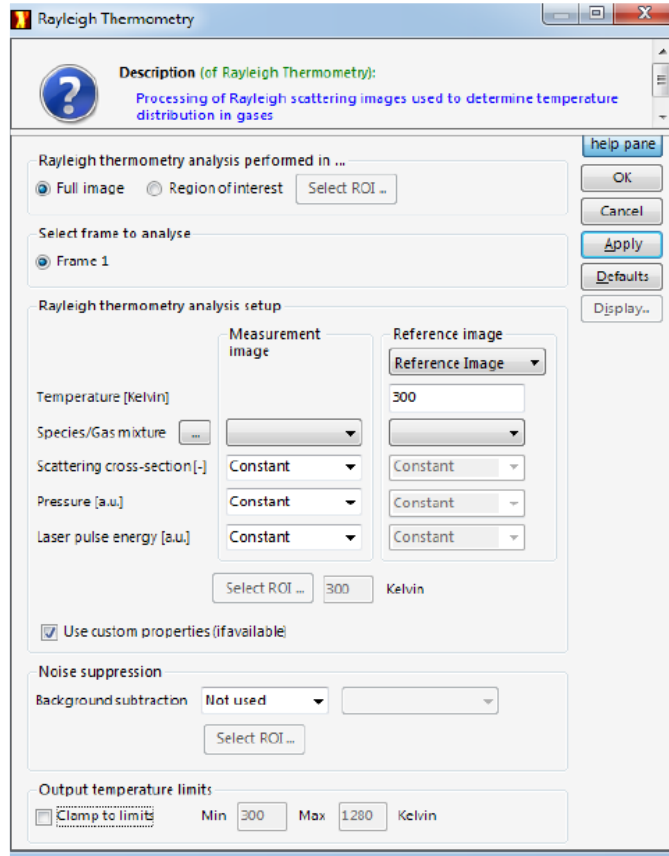
Kalibrasyon ve ölçüm görüntüleri farklı klasörlerde kaydedilmektedir. Yazılım üzerinden, ortamda bulunan toz, is vb. partiküllerden kaynaklanan Mie saçınımlarından kaynaklı hatalar görüntü işleme teknikleri kullanılarak kısmen giderilebilir. Kalibrasyon ve ölçüm için birden fazla görüntü alınarak ölçümdeki hata azaltılmaktadır.



Şekil 4. 7 Yazılım üzerinde analiz metodu seçme ekranı

İşlenmesi istenen görüntüler seçildikten sonra Rayleigh Termometresi metodu seçilmektedir. Bu aşamadan sonra ölçüm ve referans görüntülerinin alındığı ortamdaki gaz karışımına ve lazere ait özellikler girilmektedir.

Sıcaklığını ölçmek istediğimiz alev bölgesindeki karışım, programa tanımlanmış gaz veya gaz karışımlarından seçilmektedir. Aynı zamanda molar karışım oranını bilinen bir karışım da programa tanımlanabilir. İstenilen bilgiler programa girildikten sonra analiz başlatılmaktadır. Referans ölçümlerde ortamdaki gaz, gazın yoğunluğu, gazdaki moleküllerin saçınım karakteristiği, gazın basıncı ve kullanılan lazere ait özellikler bilinmektedir.



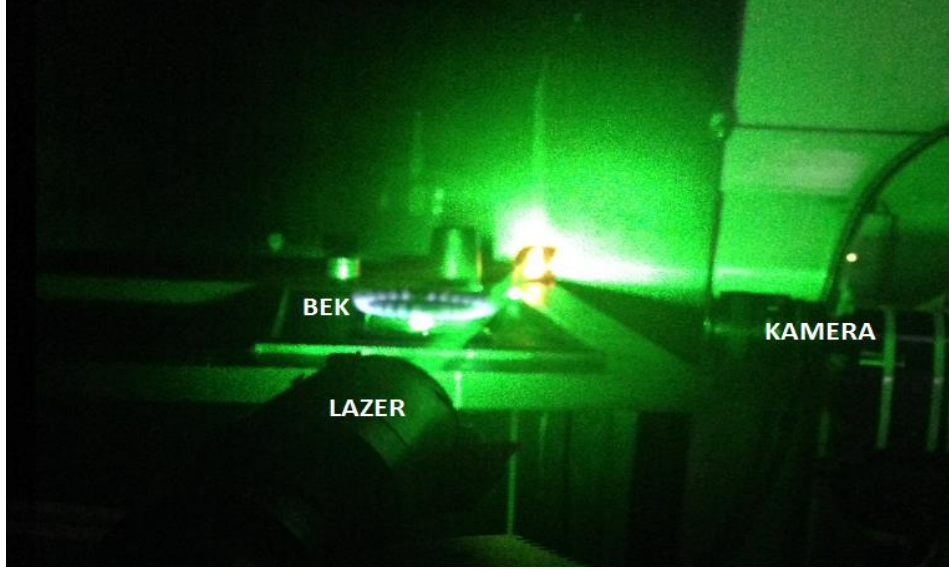
Şekil 4. 8 Rayleigh analiz metodu ekranı

Sıcaklığını ölçmek istediğimiz alanda kullanılan gaz, gazın yoğunluğu, gaz moleküllerinin saçınım karakteristiği, gazın basıncı ve kullanılan lazere ait özellikler bilindiğinde, moleküler boyutta sıcaklıklar hesaplanmaktadır.

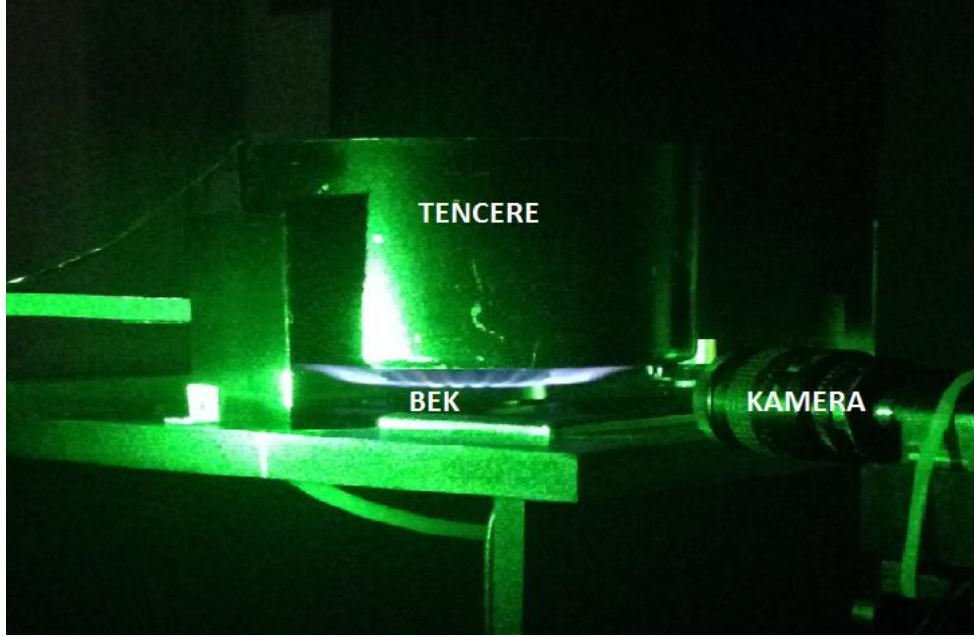
4.1.4 Rayleigh Termometresi ile Sıcaklık Ölçüm Deneyleri

Rayleigh deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Sistemde kullanılan lazer 532nm dalga boyunda 460 mJ gücündedir. 1344 x 1024 piksel çözünürlükte kamera kullanılmış ve bek alevinin portuna karşıdan bakacak şekilde yerleştirilmiştir. Lazer ise kamera ile arasında 90° açı olacak şekilde bek alevinin yan profilinden gönderilmiştir. Alevin, bek portlarından çıktığı noktadan 2'şer mm aralıklarla 5 düzlem konumunda lazer gönderilerek tek bir porttan çıkan alevin sıcaklıkları taranmıştır. Lazer ile kameranın beke göre konumu Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Deneyler sırasında lazerin kameranın açıklığı 2.8'e, sinyal yükseltici 5 kademesine ayarlanmıştır. Kalibrasyon ve ölçümler için 500'er görüntü kaydedilmiş,

daha sonra 500 görüntünün ortalaması alınarak görüntüler analiz edilerek sonuçlar çıkartılmıştır.



Şekil 4. 9 Lazer ve kameranın beke göre konumu



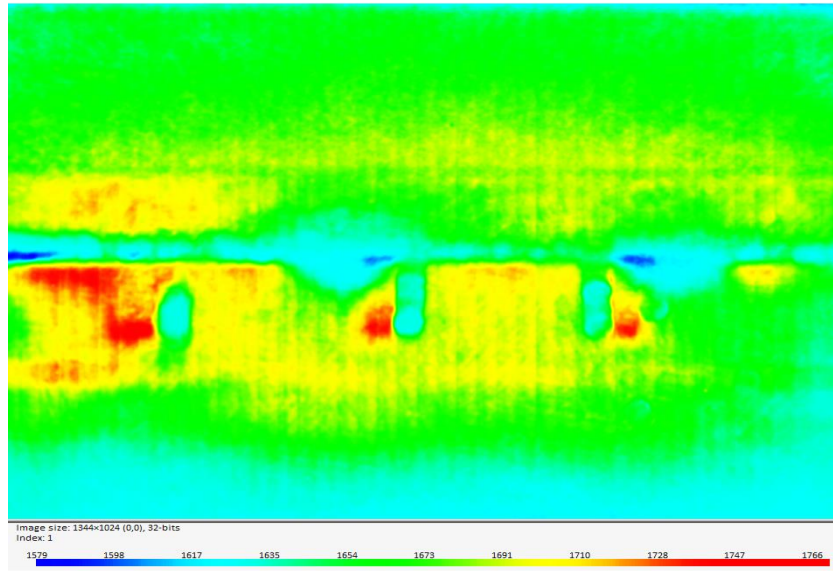
Şekil 4. 10 Bek üzerinde tencerenin konumu

4.1.5 Rayleigh Termometresi ile Sıcaklık Ölçüm Deneyle Sonuçları

Yapılan sıcaklık ölçüm sonuçları her bir tencere yüksekliği (H-Tencere) için ve her bir düzlem konumu için (L) olarak tanımlanmıştır. 4 farklı tencere yüksekliğinde, 5 farklı düzlem konumunda deneyler gerçekleştirilmiştir.

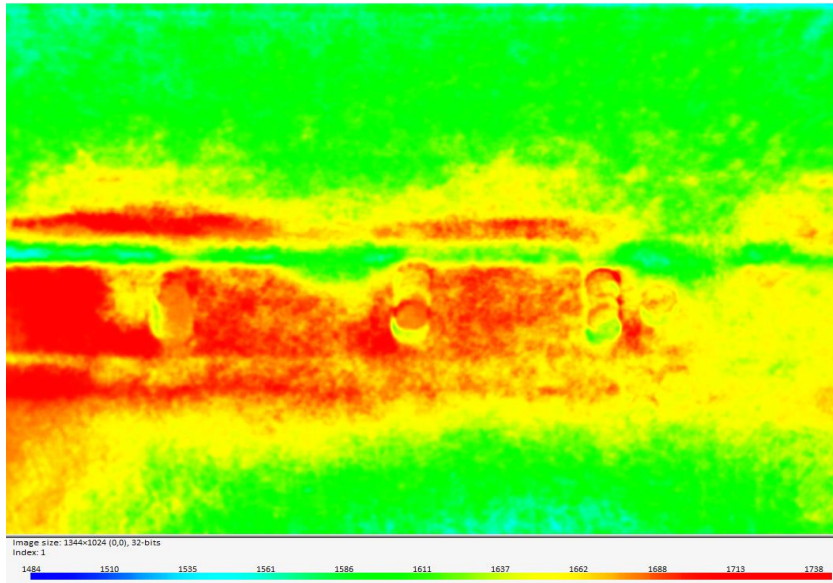
H-Tencere 40 mm için:

L=1



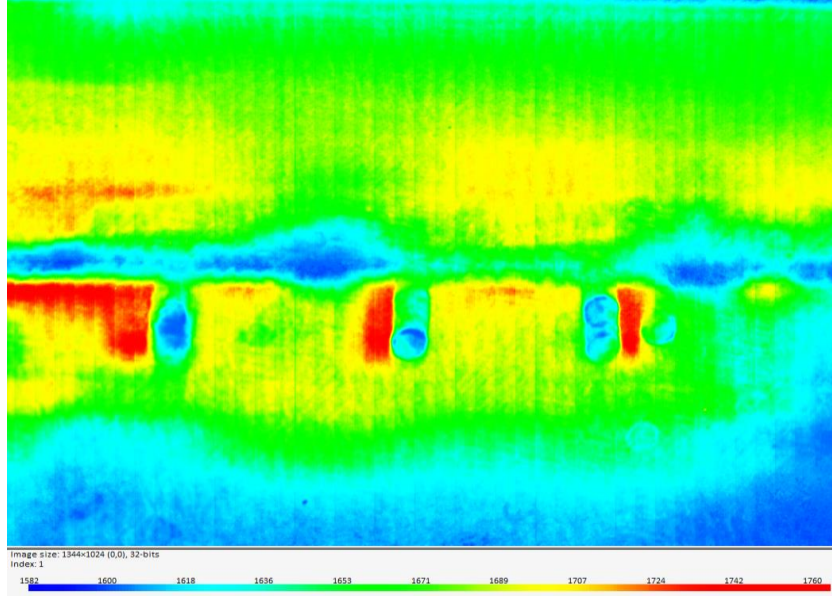
Şekil 4. 11 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 1'in sıcaklık dağılımı

L=2



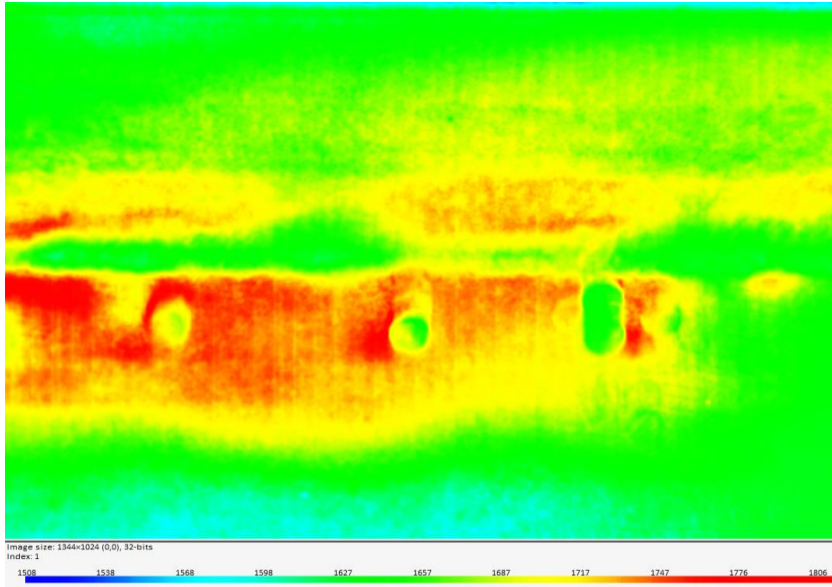
Şekil 4. 12 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 2'nin sıcaklık dağılımı

L=3



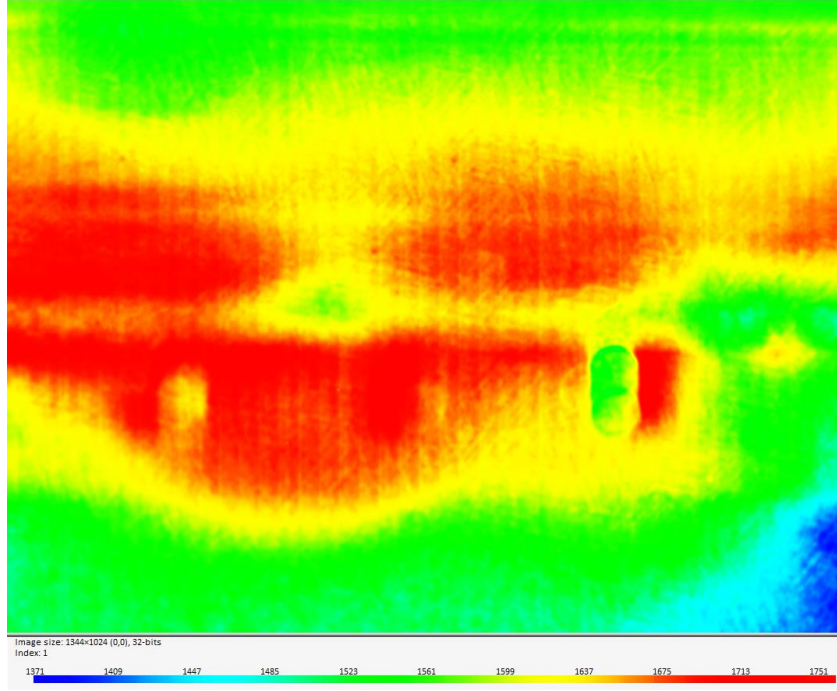
Şekil 4. 13 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 3'ün sıcaklık dağılımı

L=4



Şekil 4. 14 40 mm tencere yüksekliğinde düzlem 4'ün sıcaklık dağılımı

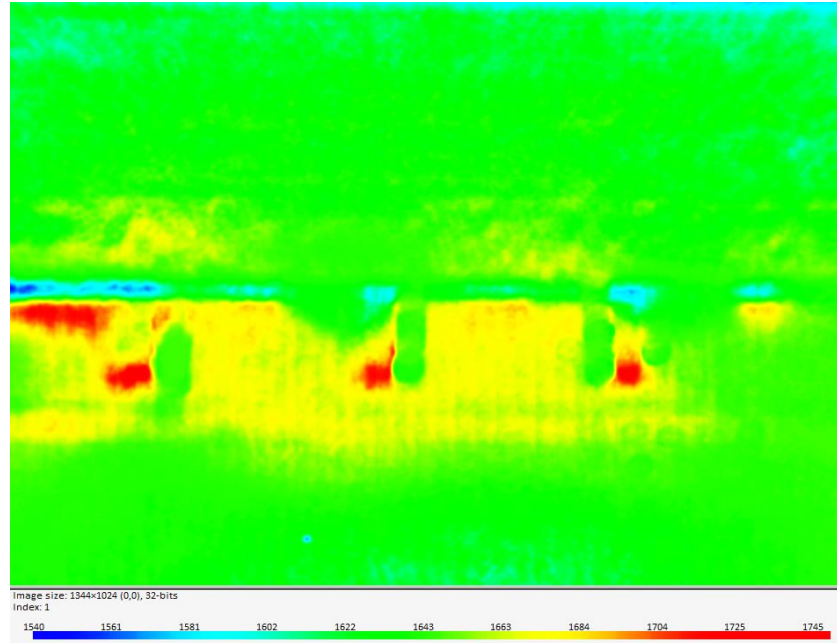
L=5



Şekil 4. 150 mm tencere yüksekliğinde düzlem 5'in sıcaklık dağılımı

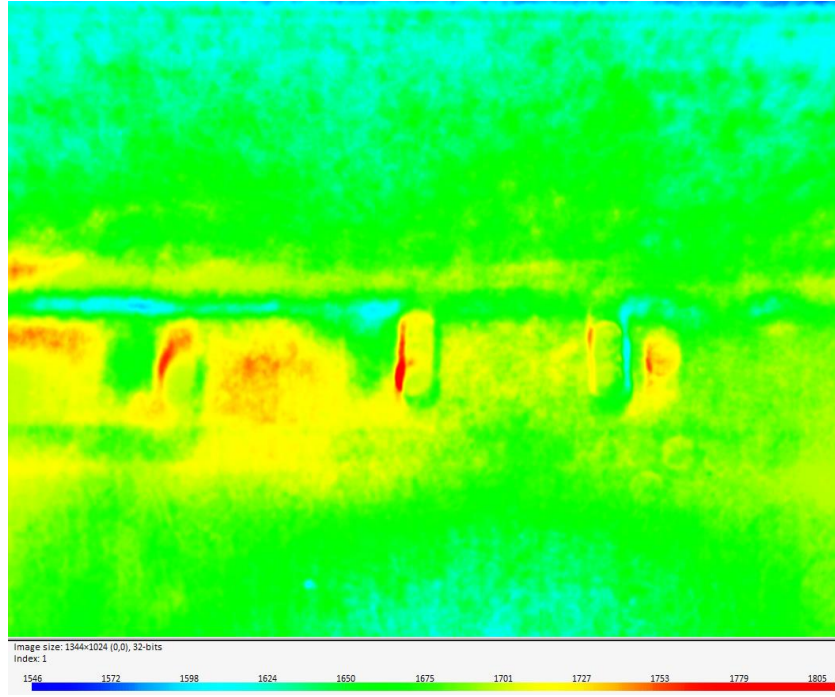
H-Tencere 43mm için:

L=1



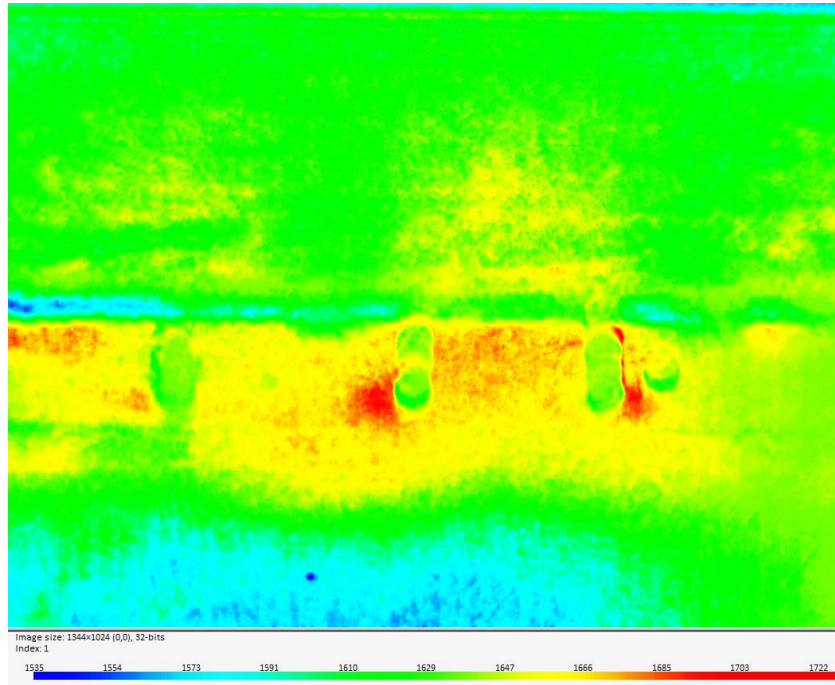
Şekil 4. 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 1'in sıcaklık dağılımı

L=2



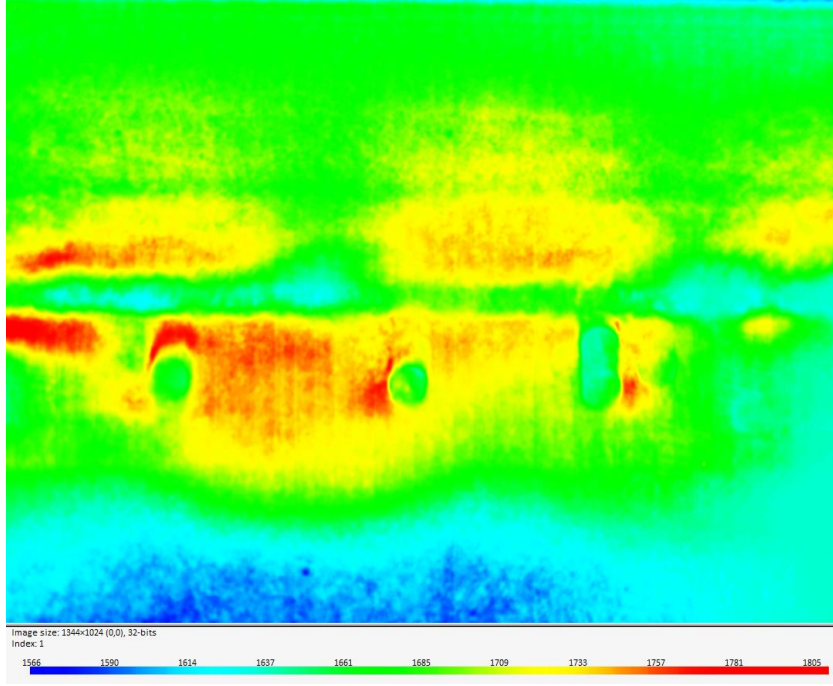
Şekil 4. 17 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 2'nin sıcaklık dağılımı

L=3



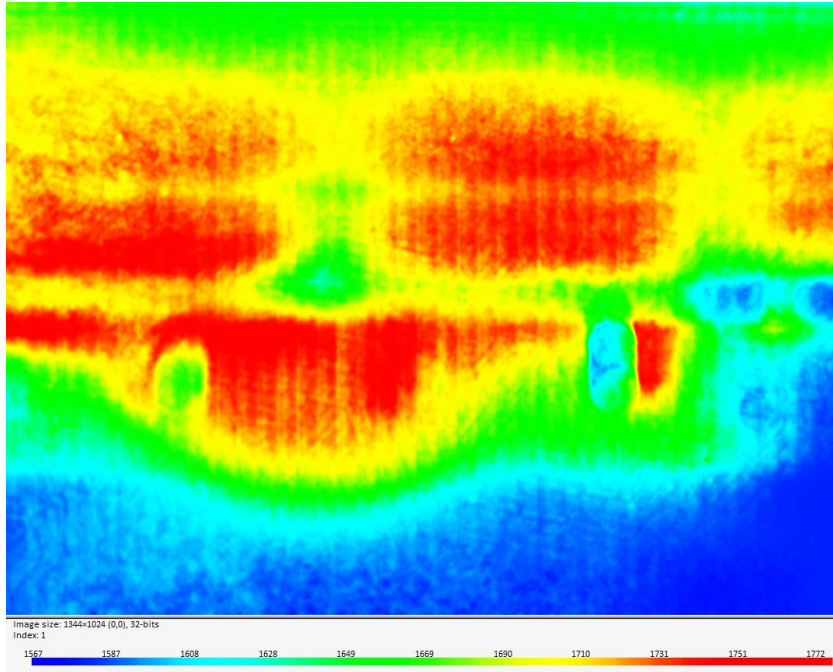
Şekil 4. 18 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 3'ün sıcaklık dağılımı

L=4



Şekil 4. 19 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 4'ün sıcaklık dağılımı

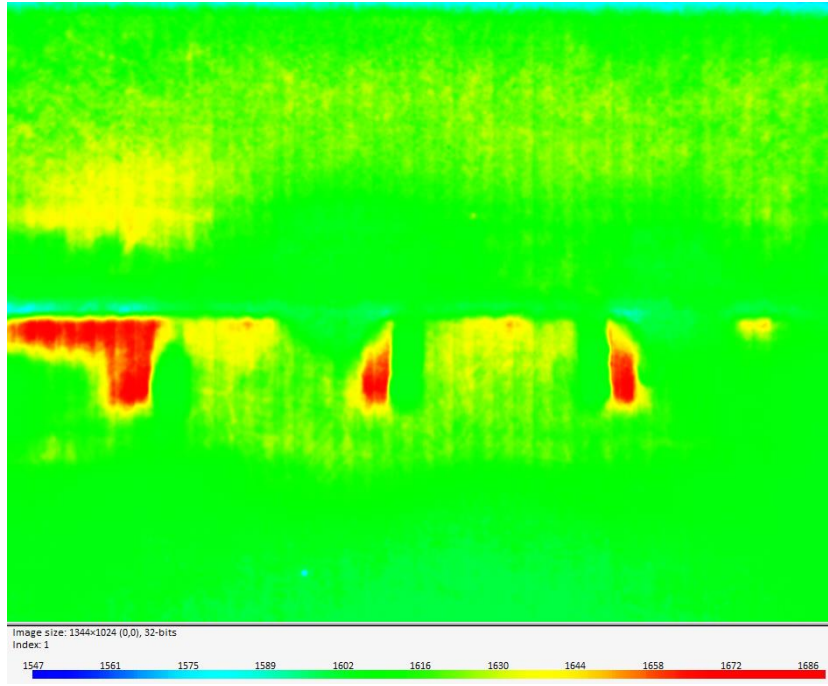
L=5



Şekil 4. 20 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 5'in sıcaklık dağılımı

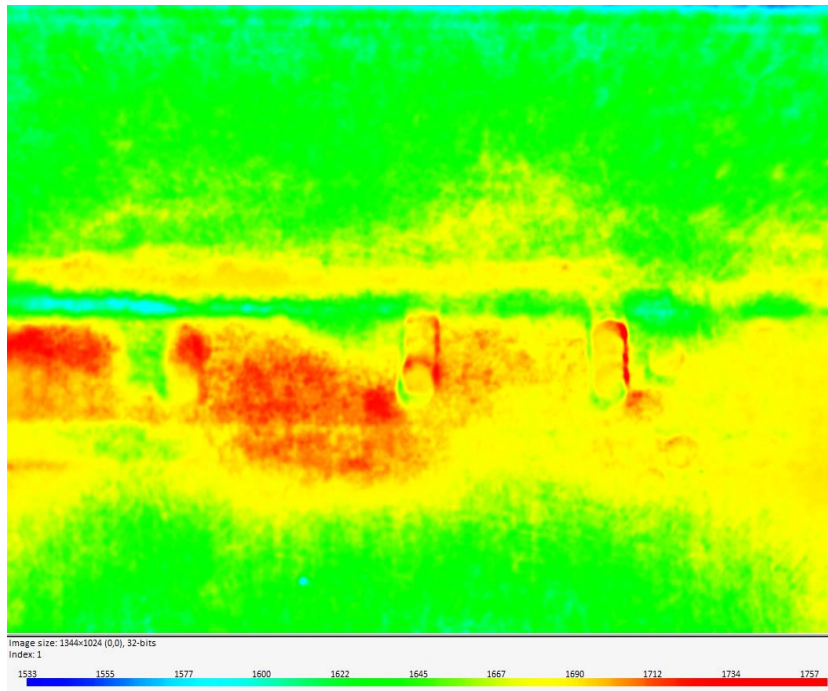
H-Tencere 45mm için:

L=1



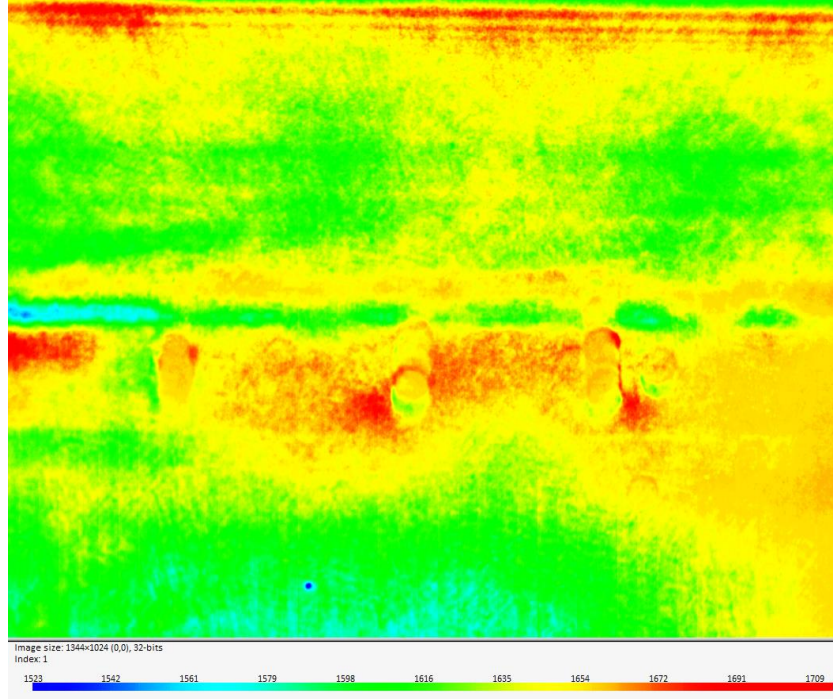
Şekil 4. 21 43 mm tencere yüksekliğinde düzlem 1'in sıcaklık dağılımı

L=2



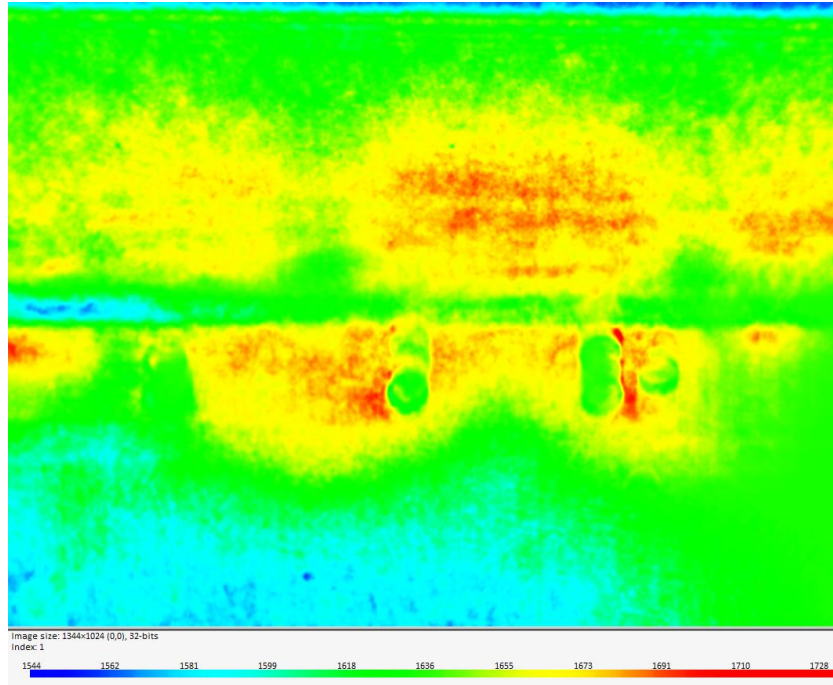
Şekil 4. 22 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 2'nin sıcaklık dağılımı

L=3



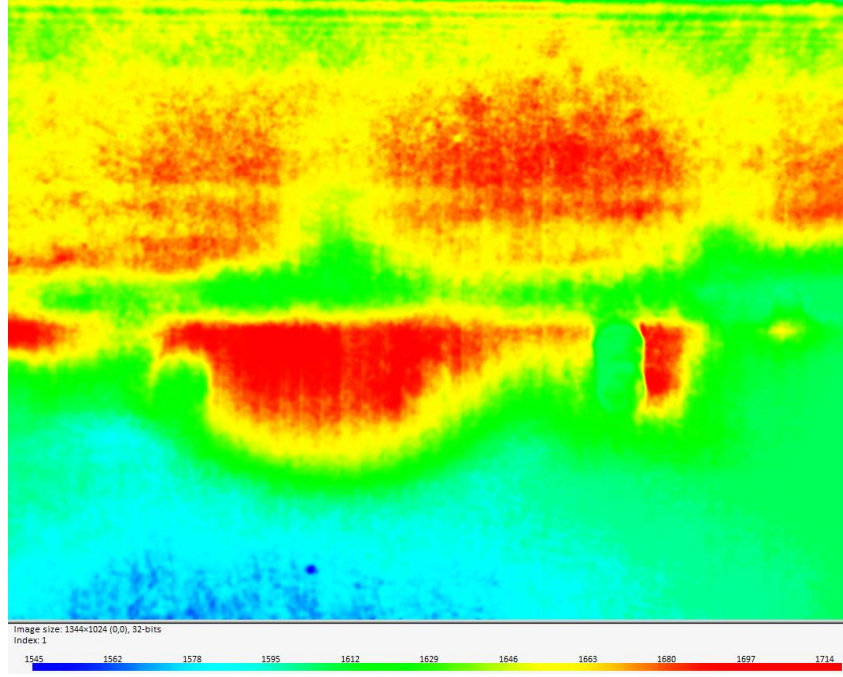
Şekil 4. 23 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 3'ün sıcaklık dağılımı

L=4



Şekil 4. 24 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 4'ün sıcaklık dağılımı

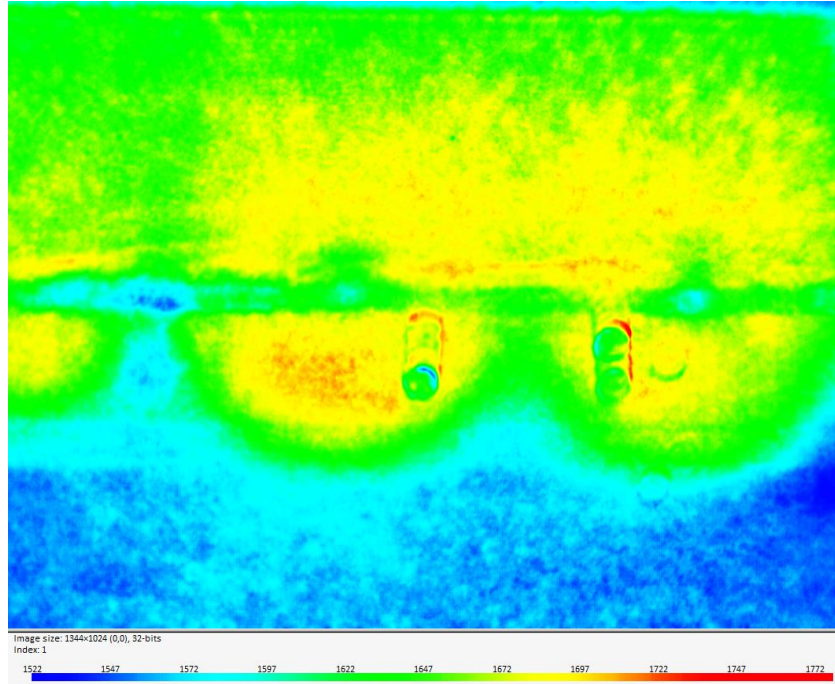
L=5



Şekil 4. 25 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 5'in sıcaklık dağılımı

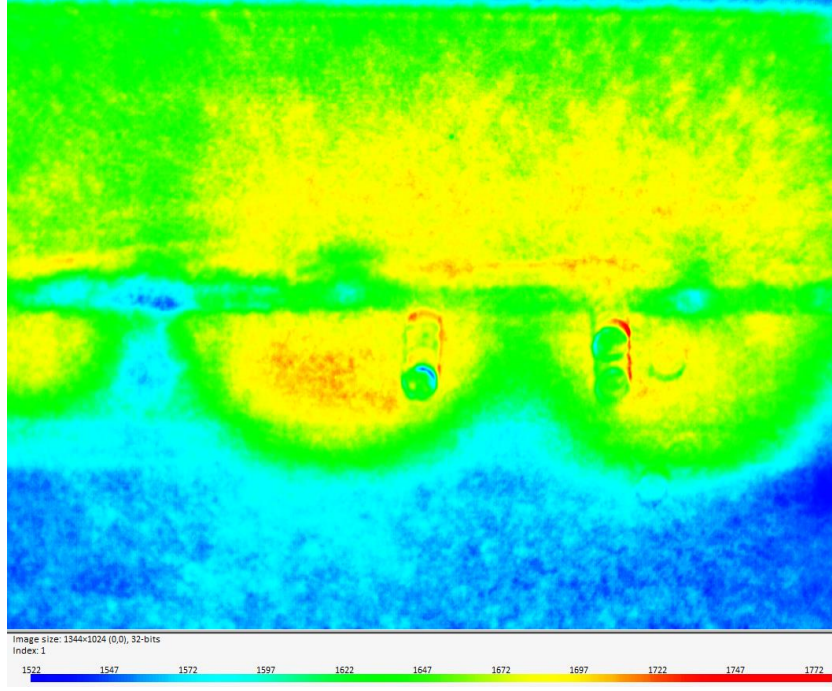
H-Tencere Yüksekliği 50mm için:

L=1



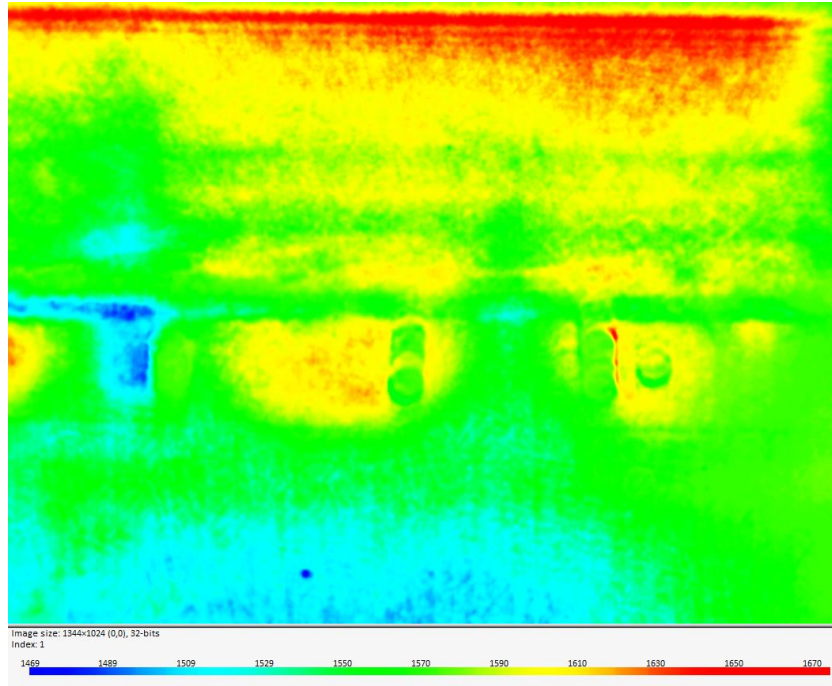
Şekil 4. 26 50 mm tencere yüksekliğinde düzlem 1'in sıcaklık dağılımı

L=2



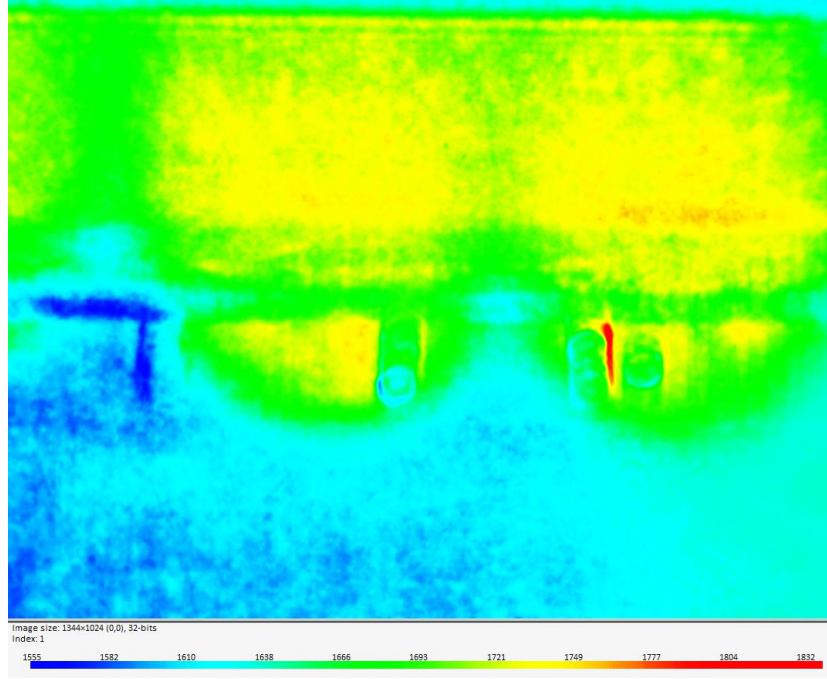
Şekil 4. 27 50 mm tencere yüksekliğinde düzlem 2'nin sıcaklık dağılımı

L=3



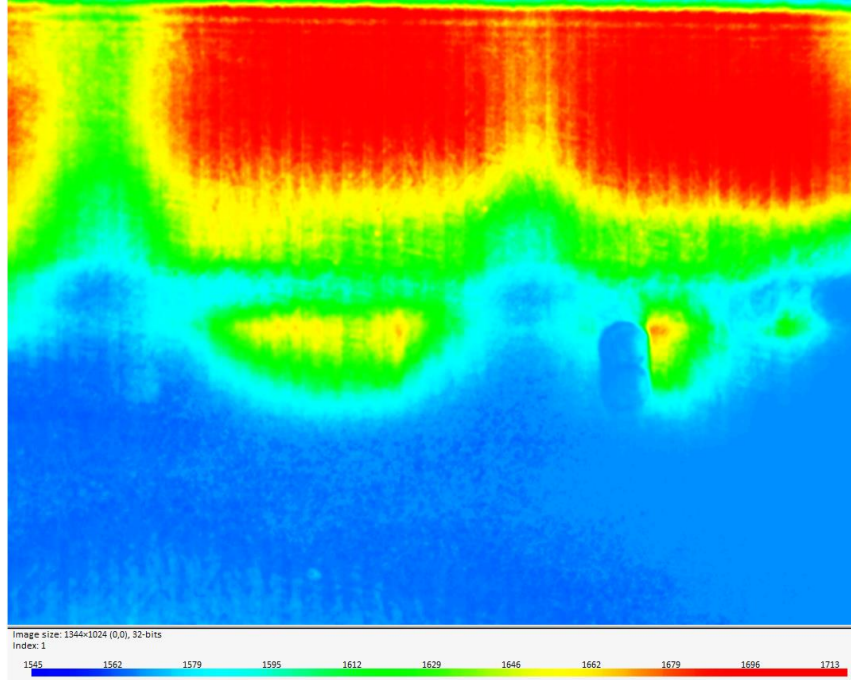
Şekil 4. 28 50 mm tencere yüksekliğinde düzlem 3'ün sıcaklık dağılımı

L=4



Şekil 4. 29 450 mm tencere yüksekliğinde düzlem 4'ün sıcaklık dağılımı

L=5



Şekil 4. 30 45 mm tencere yüksekliğinde düzlem 5'in sıcaklık dağılımı

4.2 Emisyon Deneyleeri

Gazlı ocaklarda emisyon testleri 2008 + A3: 2013 EN 30-1-1 standartlarına göre yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, yanma ürünlerinden numune alınabilmesi için 2,9kW güç veren ev tipi bir yakıcı kullanılmıştır. 220 mm çapında yuvarlak tencere için, standartlarda ölçüleri belirlenmiş numune alma aparatı kullanılmıştır. 220mm çapındaki tencerenin üzerine numune alma aparatı yerleştirilir. Yanma ürünleri numune alma aparatının üst kısmından bu gazların bazıları ayrıştırılarak alınır. Yanma olayı sırasında meydana gelen su buharı yoğunlaştırılarak ayrılır. Deney başladıktan 20 dakika sonra numunden, ölçüm. Hava ve su bulundurmayan yanma ürünleri ile ilgili hacimsel CO içeriği aşağıdaki denklem (4.3) ile verilir:

$$\% (CO)_N = \% (CO)_M \times \frac{\% (CO_2)_N}{\% (CO_2)_M} \quad (4.3)$$

$\% (CO)_N$ = Hava bulundurmayan kuru yanma ürünlerine göre CO içeriğinin hacimsel yüzdesi

$\% (CO_2)_N$ =Hava bulundurmayan kuru yanma ürünleri için hesaplanmış CO₂'nin hacimsel yüzdesi

$\% (CO)_M$ ve $\% (CO_2)_M$ = Yanma deneyi esnasında kuru numude ölçülen CO ve CO₂'nin hacimsel yüzdesi

Deney gazları için (CO₂)_N'nin % değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 2 Deney gazları için CO₂ Hacimsel Yüzdesi (Nötr Yanmanın Kuru Ürünleri)

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 G20 gazı ile yapılmıştır. Standartlarda G20 olarak tanımlanmış doğalgazın bileşiminde, Analizörün ölçtüğü $\% (CO)_M$ ve $\% (CO_2)_M$ değerlerinin bölümü ile G20'nin yanma ürünleri için hesaplanmış olan CO₂'nin hacimsel yüzdesini çarparak CO emisyon değerine ulaşılmıştır.

Gazlar, Wobbe sayısı değerine göre üç aile olarak sınıflandırılmıştır. Wobbe sayısı, doğalgaz, LPG, hava gazı gibi gaz yakıtların gaz basınçları ve transfer özellikleri gibi

sınıflandırmalar için kullanılan bir göstergedir. H_s birim hacimdeki gazın üst ısı değeri, d ise, aynı basınç ve sıcaklıkta eşit hacimdeki kuru gazın, kuru havanın yoğunluğuna oranıdır.

$$W_s = \frac{H_s}{\sqrt{d}} \quad (4.4)$$

Bu standartlarda kullanılan gaz aileleri ve grupları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4. 3 Wobbe Sayısına göre gaz ailelerinin sınıflandırılması

Gaz aileleri ve grupları	15 ve 1013,25mbar'da Brüt Wobbe sayısı MJ/m ³	
	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

Deneyler için kullanılan gazların bileşimi Çizelge 4.4'teki değerlere mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Ayrıca karışımı oluşturan bileşenler aşağıdaki çizelgede verilen saflık mertebelerinde olmalıdır. Bu gazlar içindeki toplam H_2 , CO ve O_2 oranları %1'in ve toplam N_2 ve CO_2 oranları da %2'nin altında olmalıdır.

Çizelge 4. 4 Gaz bileşenlerinin içerikleri

Azot	N_2	99%
Hidrojen	H_2	99%
Metan	CH_4	95%
Propen	C_3H_6	95%
Propan	C_3H_8	95%
Bütan	C_4H_{10}	95%

Her ülkede, yerel gaz dağıtım durumuna göre (gaz bileşimi ve gaz basıncı) farklı sınıflandırmalar yapılmıştır. Gaz grupları veya ailelerine karşılık gelen farklı deney gazlarının ana özellikleri ve bileşimleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. 5 Gaz grupları veya ailelerine karşılık gelen farklı deney gazlarının ana özellikleri ve bileşimleri

Gaz aileleri ve grupları	Deney gazları	Sembol	Hacimsel Bileşim %	Wi MJ/m ³	Hi MJ/m ³	Ws MJ/m ³	Hs MJ/m ³	d
1. Aile gazları								
Grup a	Referans gaz Tam olmayan yanma, alev kopma ve kurumlanma sınır gazı	G110	CH ₄ =28 H ₂ =50 N ₂ =24	21,76	13,95	24,75	15,87	0,411
	Geri tepme sınır gazı	G112	CH ₄ =17 H ₂ =59 N ₂ =24	19,48	11,81	22,36	13,56	0,367
2. Aile gazları								
Grup H	Referans gaz	G20	CH ₄ =100	45,67	34,02	50,72	37,78	0,555
	Tam olmayan yanma, kurumlanma sınır gazı	G21	CH ₄ =87 C ₃ H ₈ =13	49,6	41,01	54,76	45,28	0,684
	Geri tepme sınır gazı	G222	CH ₄ =77 H ₂ =23	42,87	28,53	47,87	31,86	0,443
	Alev kopma sınır gazı	G23	CH ₄ =92,5 N ₂ =7,5	41,11	31,46	45,66	34,95	0,586
Grup L	Referans gaz ve geri tepme sınır gazı	G25	CH ₄ =86 N ₂ =14	37,38	29,25	41,52	32,49	0,612
	Tam olmayan yanma, kurumlanma sınır gazı	G26	CH ₄ =80 C ₃ H ₈ =7 N ₂ =13	40,52	33,36	44,83	36,91	0,676
	Alev kopma sınır gazı	G27	CH ₄ =82 N ₂ =18	35,17	27,89	39,06	30,98	0,629
Grup E	Referans gaz	G20	CH ₄ =100	45,67	34,02	50,72	37,78	0,555
	Tam olmayan yanma, kurumlanma sınır gazı	G21	CH ₄ =87 C ₃ H ₈ =13	49,6	41,01	54,76	45,28	0,684
	Geri tepme sınır gazı	G222	CH ₄ =77 H ₂ =23	42,87	28,53	47,87	31,86	0,443
	Alev kopma sınır gazı	G231	CH ₄ =85 N ₂ =15	36,82	28,91	40,9	32,11	0,617

3. Aile gazları								
3. Aile ve grup 3 B/P	Referans gaz Tam olmayan yanma, alev kopma ve kurumlanma sınır gazı	G30	n - C ₄ H ₁₀ =50 l - C ₄ H ₁₀ =50	80,58	116,09	87,33	125,81	2,075
	Alev kopma sınır gazı	G31	C ₃ H ₈ =100	70,69	88,00	76,84	95,65	1,550
	Geri tepme sınır gazı	G32	C ₃ H ₆ =100	68,14	82,78	72,86	88,52	1,476
Grup 3P	Referans gaz Tam olmayan yanma, alev kopma ve kurumlanma sınır gazı Alev kopma sınır gazı	G31	C ₃ H ₈ =100	70,69	88,00	76,84	95,65	1,550
	Geri tepme ve kurumlanma sınır gazı	G32	C ₃ H ₆ =100	68,14	82,78	72,86	88,52	1,476

Deney basınçları, yani çalışma durumunda cihazın gaz giriş bağlantısına verilen statik basınçlar, Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4. 6 Deney gazlarının basınçları

Cihaz Kategorisi	Deney Gazı	p _n mbar	p _{min} mbar	p _{maks} 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, G31, G32	29	20	35
	G31, G32	37	25	45
3. Aile gaz 3+ (çift 50/67)	G30, G31, G32	50	42,5	57,5
	G31, G32	67	50	80

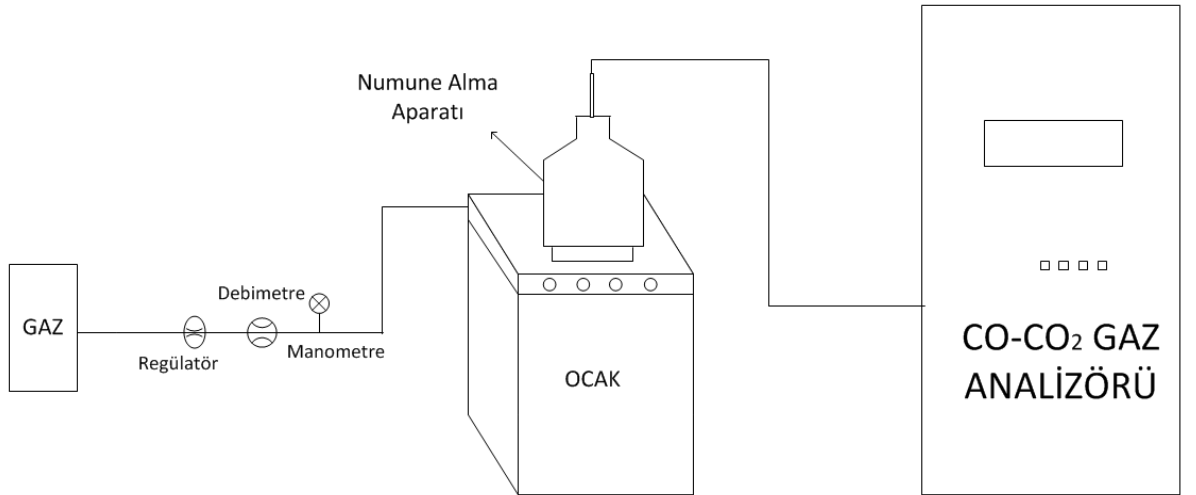
Deneyde kullanılan gazlar, uygun test basınçlarına ayarlanır. Kullanılan deney gazının yanma ürünlerindeki bulunması gereken azami CO içeriği Çizelge 4.7’de verilmiştir [13].

Çizelge 4. 7 Gazın çeşidine göre azami CO içeriği

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	1/2 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

4.2.1 CO Emisyon test düzeneği ve Emisyon Ölçümleri

CO emisyon ölçüm deney düzeneği, CO-CO₂ gaz analizörü, numune alma aparatı, gazlı ocak, debimetre, manometre, regülatör ve gaz tüpünden oluşmaktadır. Emisyon ölçüm deney düzeneğinin şematik görüntüsü Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4. 31 Emisyon deney düzeneğinin şematik görünümü

Yanma ürünlerinin analizi için kullanılan SIEMENS marka ULTRAMAT 23 model gaz analizörü Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 32 CO-CO₂ Gaz analizörü

2,9 kW'lık güce sahip ev tipi bir yakıcı üzerine 220mm çapındaki tencere yerleştirilmiştir. Tencere içerisine 2 litre su eklenir. Tencere üzerine yerleştirilmiş numune alma aparatı Şekil 4.33'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 33 Numune alma aparatı

Boyutları standartlarca belirlenmiş numune alma aparatı, tencere üzerine yerleştirilmiştir. 2. Aile H grubunda yer alan G20 gazı için emisyon deneylerinde kullanılan P_{maks} değeri 25mbar olarak Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Gazın basıncı,

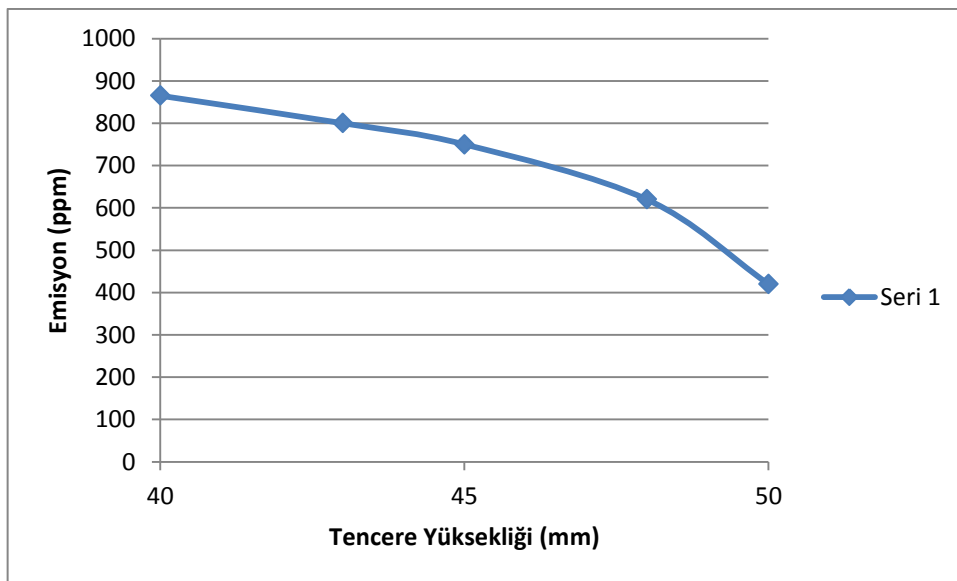
regülatör aracılığıyla 25mbara ayarlanır. 20 dakika boyunca sistem çalıştırılır. 20 dakikanın sonunda analizör, yanma deneyi esnasında kuru numude ölçülen CO ve CO₂'nin hacimsel yüzdesini ölçerek sonuçları ekrana yansıtır. Hava bulundurmeyan kuru yanma ürünleri için hesaplanmış CO₂'nin hacimsel yüzdesi G20 gazı için Çizelge 4.2'de 11,7 olarak verilmiştir. Kuru numunede ölçülen CO ve CO₂'nin hacimsel yüzdesinin birbirine bölümleriyle, hesaplanmış CO₂'nin hacimsel yüzdesiyle çarpılmasıyla, CO emisyon değeri hesaplanır.

4.2.2 Deneysel Sonuçlar

Emisyon deneyleri doğal gaz ile 40, 43, 45, 48 ve 50 mm tencere yüksekliklerinde yapılmıştır. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4. 8 Farklı Tencere yüksekliklerinde emisyon değerleri

Tencere Yüksekliği (mm)	(CO) _M	(CO ₂) _M	(CO ₂) _N	(CO) _N
40	394	5,33	11,7	865
43	320	4,68	11,7	800
45	296	4,62	11,7	750
48	210	3,96	11,7	620
50	135	3,76	11,7	420



Şekil 4. 34 Farklı tencere yüksekliklerindeki CO emisyon grafiği

Deney sonuçları ızgara yüksekliğinin artmasıyla emisyon değerlerinin düştüğünü göstermektedir. Izgara yüksekliği arttıkça alev, tencere tabanından uzaklaşır. Böylelikle alev cephesi daha fazla oksijen ile temas edebilir hale gelir. Daha fazla oksijen, yanmanın verimini arttırarak oksijen bakımından zengin tam yanma gerçekleşmesini sağlar. Yanma sonunda oluşan CO miktarını azaltmış olur.

YANMANIN SAYISAL MODELLENMESİ

Yanmanın sayısal modellenmesi, ev tipi bir yakıcı için yapılmıştır. Çözüm süresinin kısılması ve daha detaylı incelenmesi açısından yakıcı, periyodik olarak modellenmiştir. Farklı tencere yükseklikleri için de parametrik çalışma yapılmıştır. Sayısal modellemede, taşınım ve ışıma ısı transfer mekanizmaları kullanılmıştır. Başlangıç koşulu olarak da deneylerde elde edilen değerler kullanılmıştır. Yanma sonucunda oluşan ısının tamamı tencereye aktarılamadığı için, yakıcının ısı aktarma verimine göre, yakıcıyla bek tablası, yakıcıyla hava ve tencereyle su arasında ısı taşınım katsayıları hesaplanmış ve sayısal modellemede bu katsayılar kullanılmıştır.

Ev tipi bir yakıcıdaki yanmanın modellenmesinde, akış hacmi içerisinde oluşturulan çözüm ağında farklı bileşenlere ait korunum denklemlerinin sonlu hacimler yöntemi ile çözümlenmesi gerçekleştirilmiş, basınç esaslı çözüm algoritması kullanılmıştır.

5.1 Sonlu Hacimler Yöntemi

Sonlu hacim yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerin cebirsel denklemler halinde sunulması ve değerlendirilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemine benzer olarak, çözüm ağından oluşturulmuş geometrideki ayrık noktalarda ilgili değerlerin hesaplanmasına dayanır.

Sonlu hacimler metodu, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen analitik çözümü güç problemlerin çözümlenmesinde, bütünü belirli sayıda sonlu parçalara ayırarak çözüm üretmek amacıyla kullanılan bir sayısal çözümleme yöntemidir. Sonlu hacimler metodu, ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarının temel aldığı yöntemdir.

Sonlu sayıda hacimlere bölünen bütünün her bir parçasına korunum denklemleri uygulanır ve hesaplanacak değişkenler sonlu hacmin merkezindeki kontrol noktasındaki değer ile ifade edilir.

Versteeg ve Malalasekera (2007), sonlu hacimler yöntemine ait temel çözüm adımlarını aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

- Tüm sayısal çözüm ağı içerisinde akışı tanımlayan denklemlerinin entegrasyonu.
- İntegral denklemlerin ayrıklaştırılması ve cebirsel denklemlere dönüştürülmesi.
- Cebirsel denklemlerin iteratif yöntemlerle çözülmesi.

5.2 Basınç Esaslı Çözüm Algoritması

Basınç esaslı sayısal çözüm algoritmasında, akışa ait hız alanının sağlanması gereken kütle korunumu koşulu, basınç düzeltme denkleminin çözülmesi ile elde edilir. Basınç düzeltme denklemi, hız alanı kütle korunumunu sağlayacak şekilde süreklilik ve momentum denklemlerinden elde edilir. Korunum denklemlerinin lineer olmaması ve birbiri ile bağımlı olması nedeniyle, çözüm işlemi tüm korunum denklemlerinin yakınsama sağlanana kadar tekrarlı olarak çözüldüğü iterasyonlar ile sağlanır.

Basınç esaslı çözüm algoritması, ayrık ve birleşik olarak iki grupta incelenir. Ayrık çözüm algoritmasında korunum denklemleri sıra ile çözülür. Bütünleşik çözüm algoritmasında ise süreklilik, momentum ve enerji denklemleri eş zamanlı olarak, türbülans ve diğer skaler büyüklükler ise korunum denklemlerinden sonra çözülür. Her iki çözüm algoritmasında da iterasyonlar yakınsama sağlanana kadar sürdürülür.

5.3 Yanma Analizinde Kullanılan Sayısal Çözümleme Metodu

Yanma prosesinin detaylı olarak incelenebilmesi, deneysel olarak belirlenemeyen süreçlerin öğrenilmesi ve katkı sağlanması amacıyla HAD analiz çalışmaları yapılmıştır. Yapılan HAD analiz çalışmalarında ek bir kod ve yazılım kullanmadan, mevcut Fluent 16.2'nin yanma modülü kullanılmıştır [14].

Fluent içerisinde çeşitli yanma modelleri bulunmaktadır. Bu modeller;

1.Species Transport

2.Non-Premix Combustion

3.Premixed Combustion

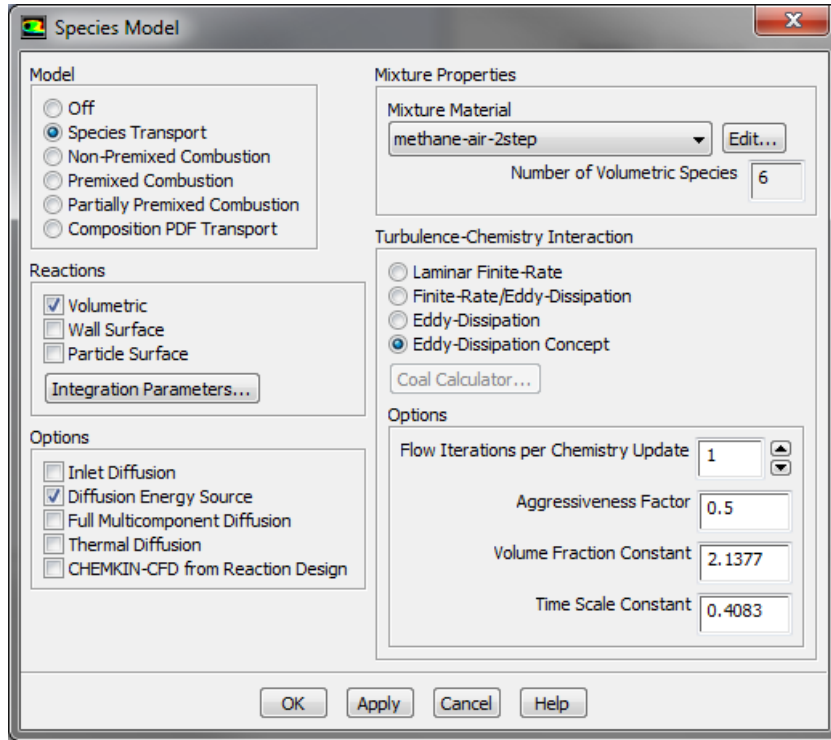
4.Partially Premixed Combustion

5.Composition PDF Transport

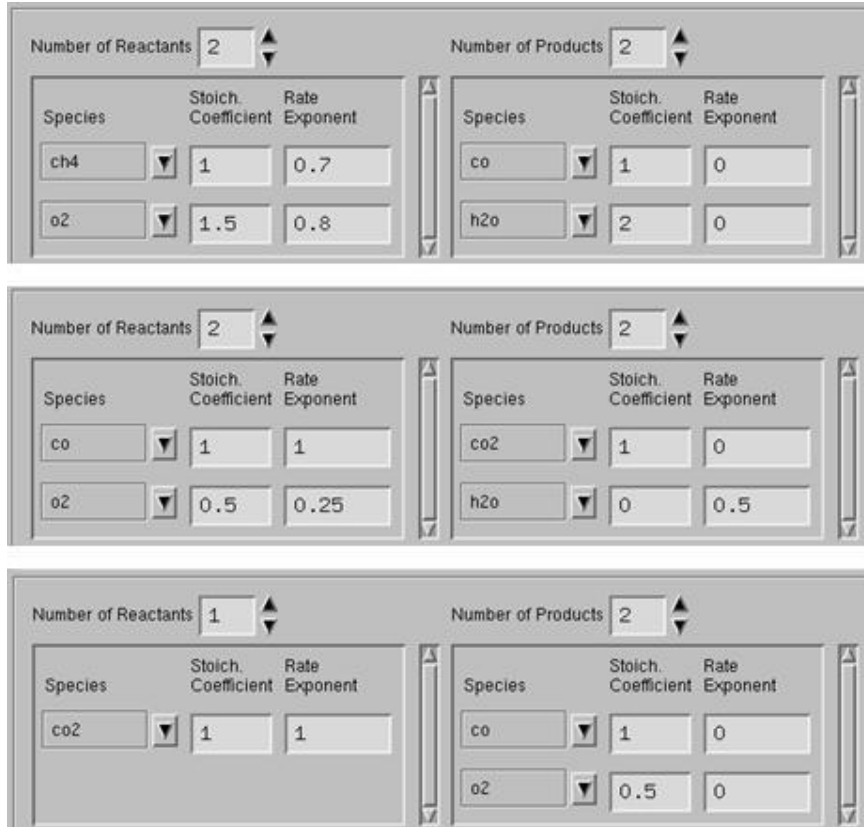
olarak 5 temel sınıfa ayrılmaktadır.

Yapılan öncül analiz çalışmalarında bu modüller detaylı olarak incelenmiş ve örnek bir bek modeli için yanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı yanma modelleri için yapılan analiz sonuçları incelendiğinde, deneysel sonuçlara en uygun modelin “Species Transport” modeli olduğu görülmüştür. Bileşenlerin kimyasal reaksiyonlarının, konveksiyon-difüzyon denklemlerinin çözümü sayesinde, her bileşenin lokal kütle kesri ANSYS Fluent tarafından öngörülmüştür. Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda, Metan-hava karışımında incelemek istediğimiz bileşikler (CH_4 , O_2 , CO , CO_2 , H_2O , N_2) içeren iki adımlı ve üç reaksiyondan oluşan modelleme yapılmıştır. Akışa ait türbülans etkileri standart k- ϵ türbülans modeli ile incelenmiştir.

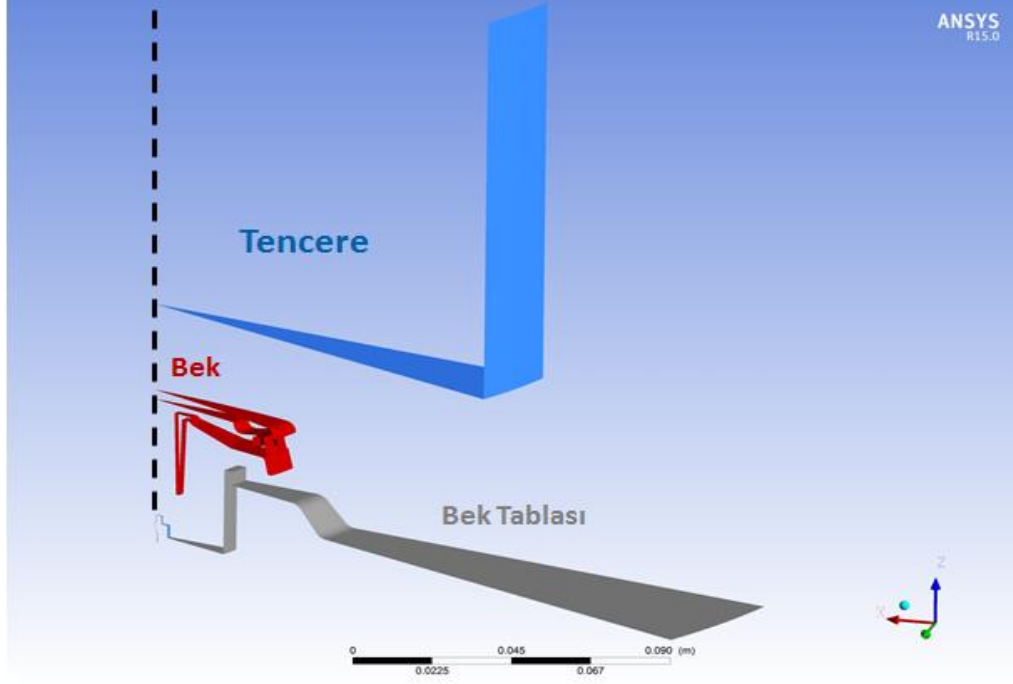
Modellemenin hem daha hızlı olması hem de daha detaylı olması amacıyla periyodik modelleme yapılmıştır. Periyodik modelleme amacıyla bir ana çıkış portunu içerecek şekilde (pasta dilimi) bir parça alınmış ve çözüm ağı oluşturulmuştur. Çözüm sürecinde, bu pasta dilimi şeklindeki yapının tam bir bek gibi davranmasını sağlayacak şekilde periyodik özellikler tanımlanmıştır. Analizleri yapılan bekin geometrisine göre $11,25^\circ$ açığa sahip olup 32 dilim var kabulüyle modellenmiş ve tam bir bek davranışı sergilenmesi sağlanmıştır.



HAD Analizleri için seçilen sayısal çözümlene metodu



Şekil 5. 1 HAD analizleri için oluşturulan tepkime adımları



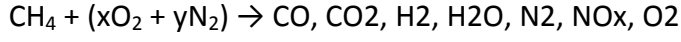
Şekil 5. 2 HAD analizleri için oluşturulan model

Oluşturulan model üzerinde, zamana bağlı ve rejim durumu için analiz yapılması mümkündür. Yanma sürecinde gerçekleşen reaksiyonları çok hızlı olması, zamana bağlı analizlerde çok küçük zaman adımlarını gerektirmektedir. Bu da çözüm süresinin de ciddi uzamalara neden olmaktadır. Bu sebeple sadece rejim durumu için analizler steady-state için analizler yapılmıştır.

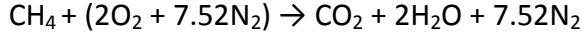
5.4 Detay HAD Analiz Çalışmaları

Yanma esnasında deneysel çalışmalarla takip edilemeyen parametrelerin belirlenebilmesi için HAD analiz çalışmaları yapılmıştır. Deneysel olarak farklı ızgara yüksekliklerinde oluşan emisyonlar belirlenmiştir. Ayrıca, farklı ızgara yüksekliklerindeki alev sıcaklıkları da Rayleigh Termometresi sistemiyle ölçülmüş emisyonlara etkileri gözlemlenmiştir. Yapılan HAD analiz çalışmaları da deneysel çalışmaların sonuçlarına katkı sağlamıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde yanmanın başladığı bölge, yanma sonucu oluşan alev sıcaklıkları, meydana gelen emisyonlar ve emisyonların biriktiği bölgeler detaylı olarak görülebilmektedir.

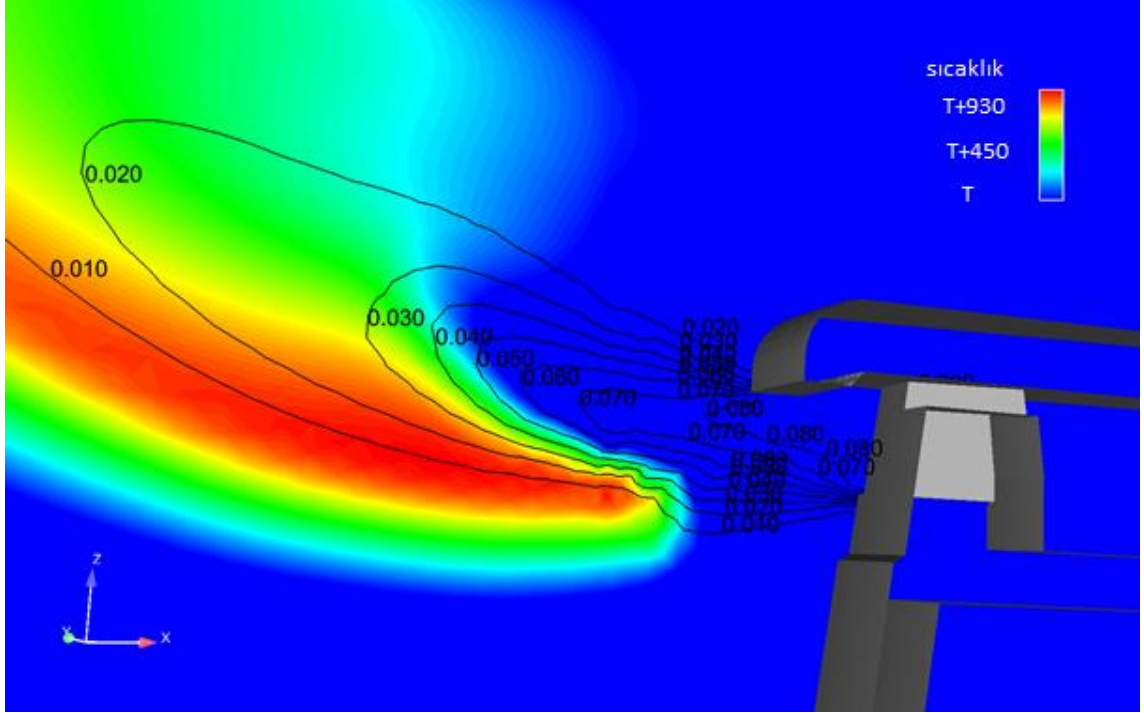
Metanın genel reaksiyonu aşağıdaki şekildedir:



Metanın sitokiyometrik yanma reaksiyonu:



Metanın sitokiyometrik yanma reaksiyonu üzerinden kütleli olarak sitokiyometrik yanma oranı hesaplanabilmektedir. 1 mol CH_4 'ün yanması için gerekli hava miktarı 2 mol O_2 , 7.52 mol N_2 gerekmektedir.



Şekil 5. 3 Yakıt-Hava Karışımının kütle kesrine göre incelenmesi

Bu reaksiyon için sitokiyometrik oran hesaplandığında:

1 mol CH_4 : 16 gr (Yakıt)

2 mol O_2 : 64 gr (Hava)

7.52 mol N_2 : 210,56 gr (Hava)

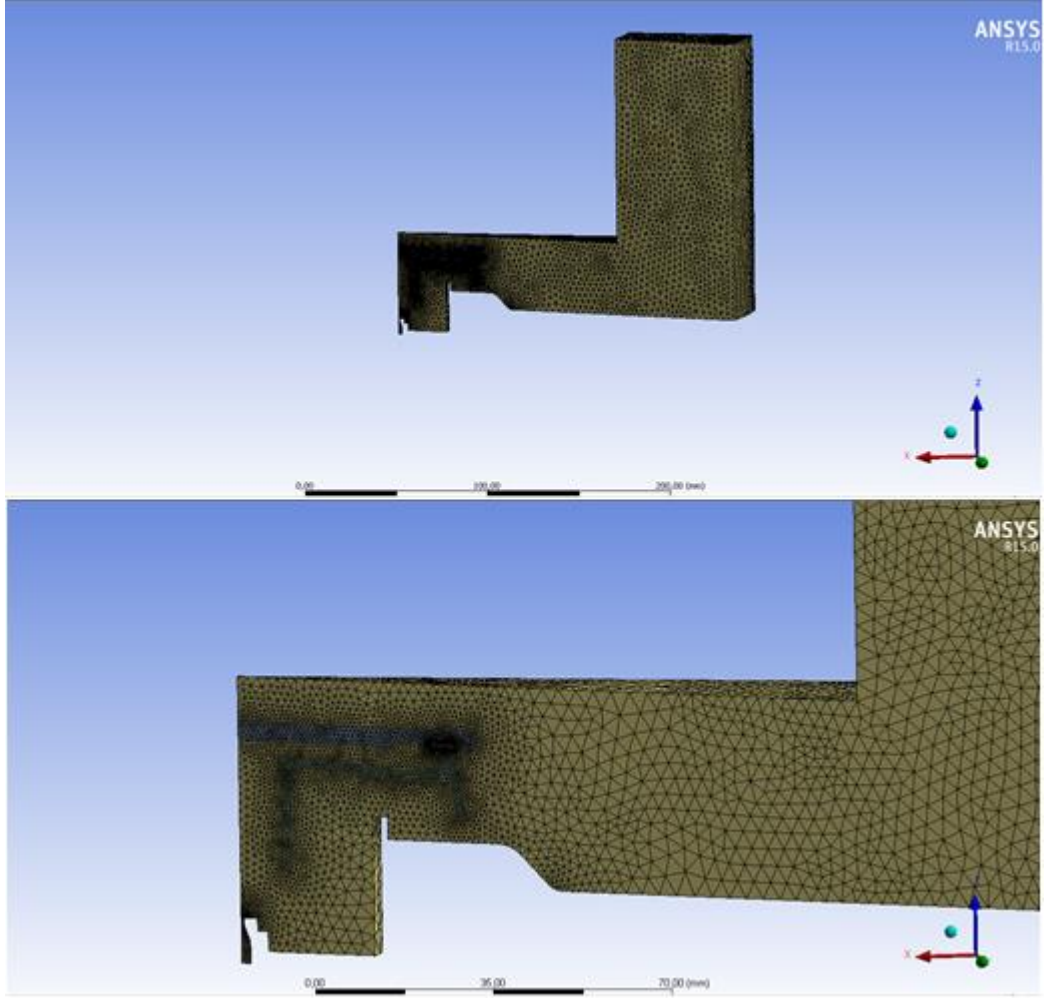
Yakıt / (Yakıt + Hava) = 0,055 [gr yakıt] / [gr yakıt + hava](mass fraction)

Bu oran tam yanmanın gerçekleşmesi için gerekli hava-yakıt oranını göstermekte olup, bu oranının büyümesi durumunda yakıtça zengin karışım, küçülmesi durumunda ise yakıtça fakir karışım oluşmaktadır.

Bu bilgi doğrultusunda, yapılan HAD analiz sonuçları incelendiğinde yanmanın başladığı ve sıcaklıkların olduğu bölgeler ile yakıt-hava karışım oranı kontürleri arasında ilişki kurulabilmektedir. Yakıt-hava karışımının 0,055'e ulaştığında tam yanma gerçekleşmekte ve yanma sonucu sıcaklıklarda artış meydana geldiği görülmektedir. HAD analizlerinde yakıt-hava karışımının 0,055'e $[\text{gr yakıt}]/[\text{gr yakıt} + \text{hava}]$ ulaştığı sırada, karışımın bulunduğu bölgeye yüksek sıcaklık bölgesi (2000 K) tanımlanarak, yanmanın başlanması sağlanmıştır. Yanmanın başlamasıyla birlikte kontrol hacmi içerisindeki O_2 kütlesi azalacaktır. Yanma reaksiyonunun durmaması için kontrol hacmi içerisindeki O_2 kütlesinin azaldığı durumlarda ortama O_2 eklemesi yapılmıştır.

5.4.1 Yanmanın Sayısal Modellenmesi için Oluşturulan Çözüm Ağı

Yanmanın sayısal modellenmesi için, bek, bek tablası ve tencere duvarları arasında kalan hacme çözüm ağı oluşturulmuştur. Akış hacminde çok sık eleman oluşturulduğunda çözüm süreçleri uzayacağı için yanma reaksiyonunun olmadığı bölgedeki çözüm ağı sayısı azaltılmıştır. Yanma reaksiyonunun olduğu bölgelerdeki eleman boyutu ve kalitesi daha önemli olduğu için o bölgelerde daha sık eleman oluşturulmuştur. Yakıt-hava karışımının 0,055 $[\text{gr yakıt} / (\text{gr yakıt} + \text{gr hava})]$ olduğu bölgedeki eleman yoğunluğuna dikkat edilerek çözüm ağı oluşturulmuştur. Şekil' de akış hacmi içerisinde oluşturulan çözüm ağının yapısı görülmektedir. Sayısal modellemeye kullanılan akış hacmine toplam 176000 adet elemandan oluşan tamamen yapısal çözüm ağı oluşturulmuştur. Yanma reaksiyonunun gerçekleştiği, bekin çıkış portlarına yakın bölgede eleman sayısının sıklaştığı Şekil 5.4'te görülmektedir. Çözüm ağı, üçgen piramit, dörtgen piramit ve çokgen piramit yapısal elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 5. 4 Çözüm Ağı'nın Oluşturulması

5.4.2 Oluşturulan Çözüm Ağı için Sınır Koşulları

Yanmanın sayısal modellenmesinde, yanma denklemlerinin çözümlenmesi gerçekleşecektir. Yanmanın, alevin kopmadan veya geri tepmeden gerçekleşebilmesi için enjektörden çıkan yakıtın hızı önemlidir. Bekten, tencereye, çevreye ve bek tablasına aktarılan ısı deney sonuçları kullanılarak hesaplanmıştır.

- Yakıt enjektöre, 24°C (297,15 K), 7,52m/s hızda girmektedir.
- Bekten taşınım ve ışınlama ile ısı geçişi olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda yanma sonucunda oluşan ısının tamamı tencereye aktarılamamaktadır. Oluşan ısının bir miktarı çevre havasına ve bek tablasına aktararak kaybedilecektir. Deney sonuçları kullanılarak, bek tablasına ısı geçişinde kullanılacak olan ısı taşınım katsayısı h_1 (W/m²K), havaya ısı geçişinde kullanılacak olan ısı taşınım katsayısı

h_2 (W/m^2K) deneysel sonuçlara uygun olarak bulunan değerlere göre girilmiştir. Hava ve bek tablası sıcaklığı da $27^\circ C$ ($300,15 K$) olarak kabul edilmiştir.

5.4.3 Yanma Reaksiyon Bileşenlerinin Özellikleri

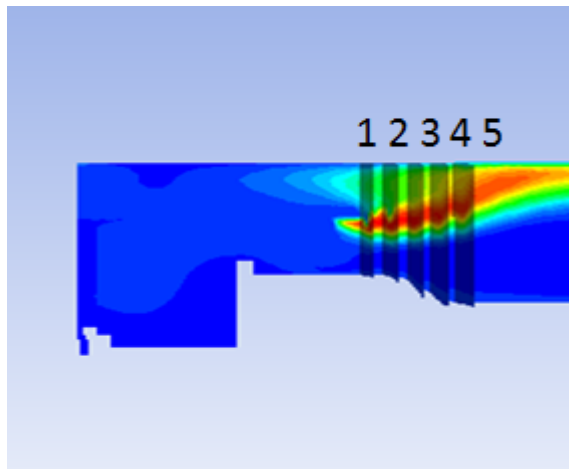
Yanma reaksiyonunun doğru olarak modellenebilmesi için, reaksiyona giren yakıt ve havanın özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Deneysel çalışmalarda, yanma reaksiyonunda yakıt olarak doğalgaz kullanılmıştır. Piyasada bulunan doğalgazın içerisinde %90 metan (CH_4), %10'luk kısmında da etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}) ağırlıklı olmak üzere diğer hidrokarbonları bulunmaktadır. Bu sebeple yapılan sayısal modellemede yakıt olarak metan (CH_4) kullanılmıştır.

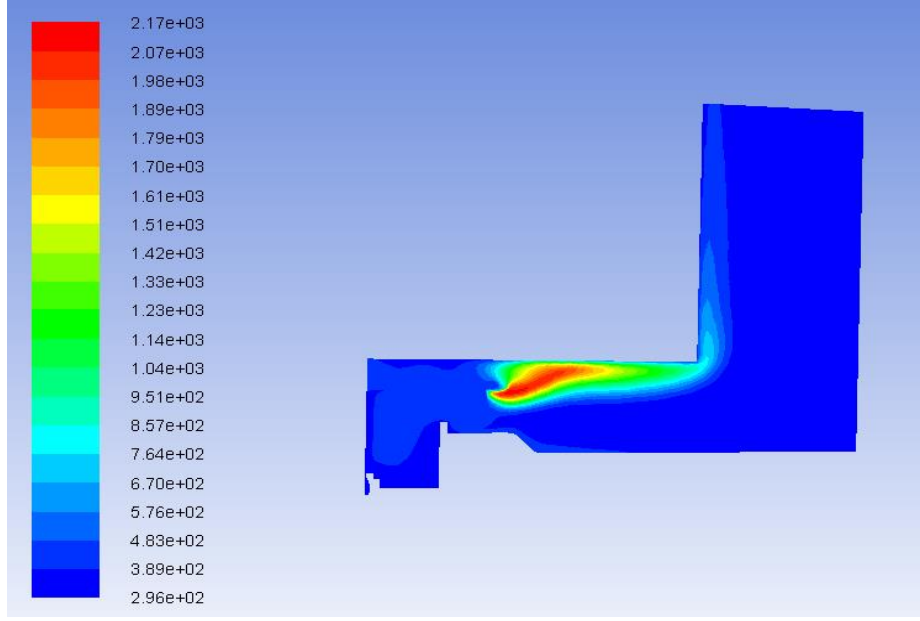
Normal şartlarda hacim olarak % 78.09 azot (N_2), % 20.95 oksijen (O_2), % 0.93 argon (Ar) ve % 0.03 karbondioksit (CO_2) ve diğer gazlardan oluşan hava kullanılmıştır.

5.5 HAD Analiz Sonuçları

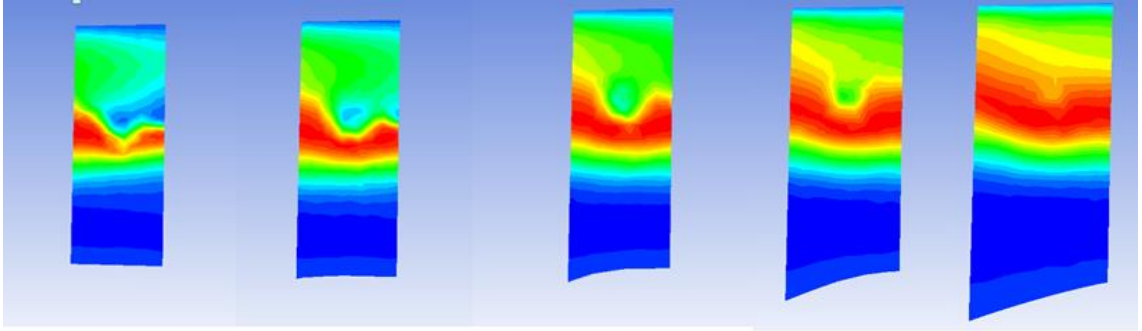
HAD analizleri 40, 43, 45 ve 50mm olmak 4 farklı tencere yüksekliği için periyodik olarak sadece bir porttan çıkan alev için yapılmıştır. Analiz sonuçları açıklanırken tencere yüksekliği H-Tencere ile gösterilmiştir. Her bir tencere yüksekliğinde akış hacminin sıcaklık dağılımlarının sonuçları alınmıştır. Ayrıca porttan çıkan alevin bekten çıktığı noktadan itibaren 2'şer mm aralıklarla 5 farklı kesitinden alınan sıcaklıklar da verilmiştir.



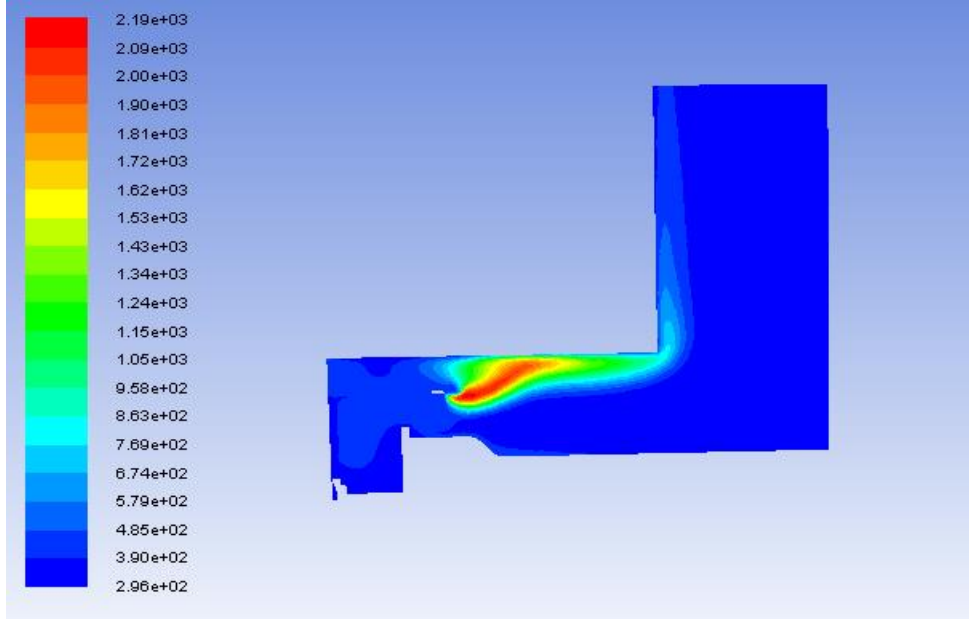
Şekil 5. 5 Alev üzerinden alınan 5 düzlemin konumu



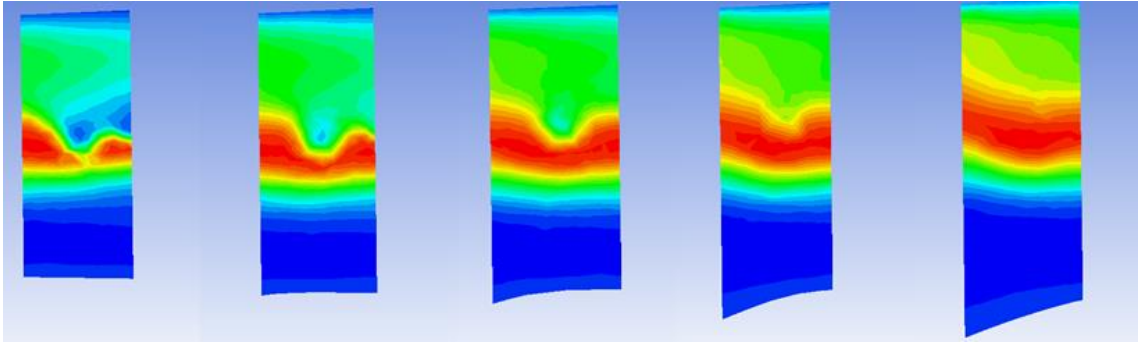
Şekil 5. 6 40 mm tencere yüksekliğinde sıcaklık sonuçları



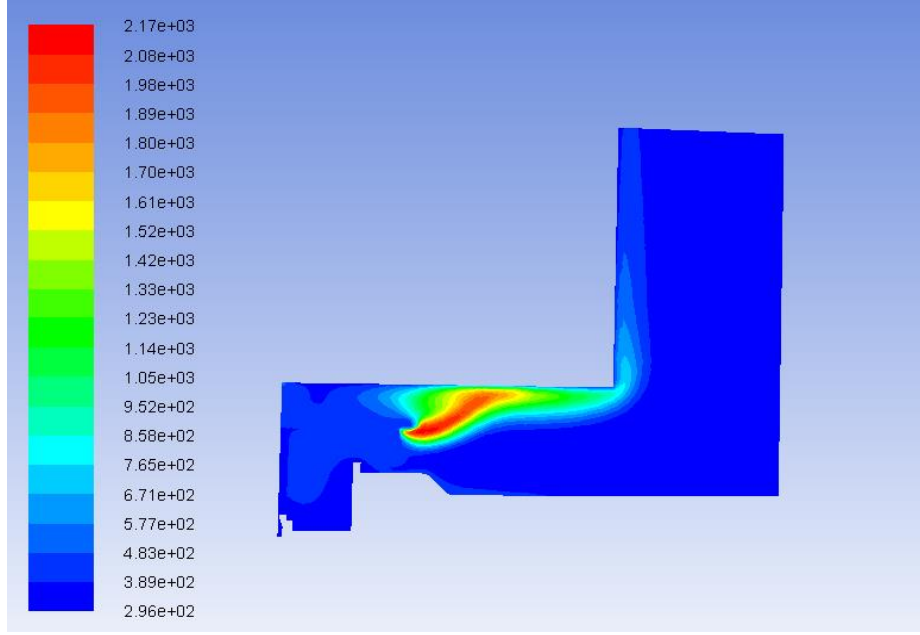
Şekil 5. 7 40 mm tencere yüksekliğinde 5 düzlemden alınan sıcaklık dağılımları



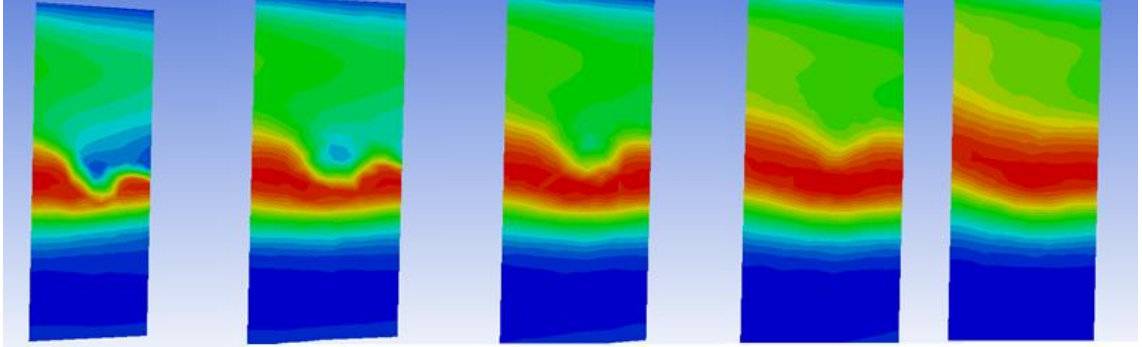
Şekil 5. 8 43 mm tencere yüksekliğinde sıcaklık sonuçları



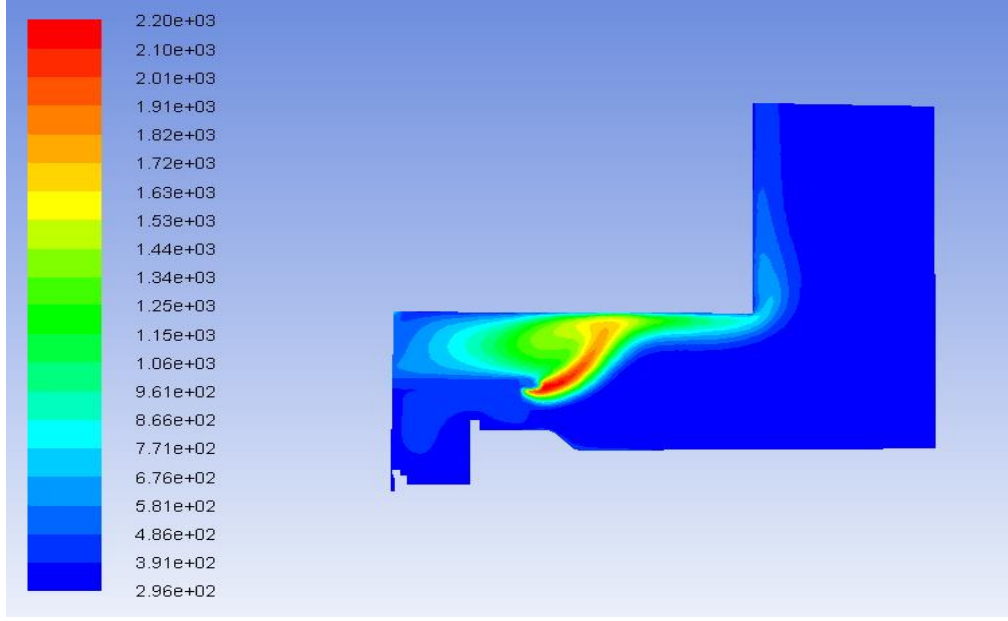
Şekil 5. 943 mm tencere yüksekliğinde 5 düzlemden alınan sıcaklık dağılımları



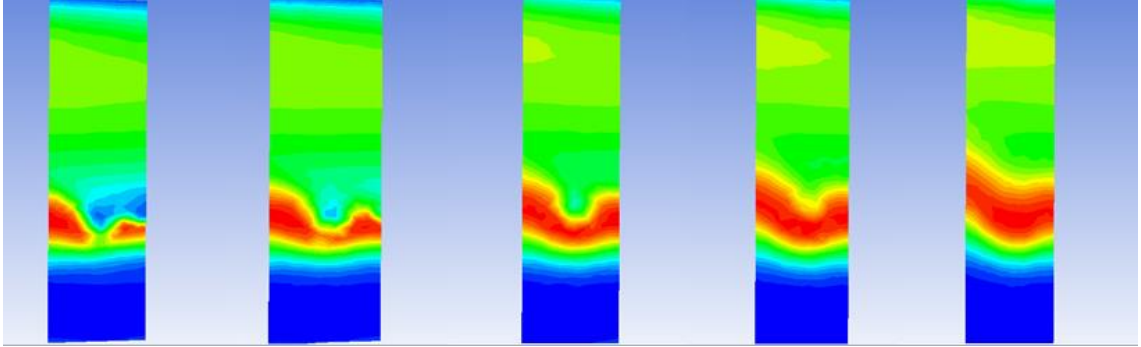
Şekil 5. 1045 mm tencere yüksekliğinde sıcaklık sonuçları



Şekil 5. 1143 mm tencere yüksekliğinde 5 düzlemden alınan sıcaklık dağılımları



Şekil 5. 12 50 mm tencere yüksekliğinde sıcaklık sonuçları



Şekil 5. 13 50 mm tencere yüksekliğinde 5 düzlemde alınan sıcaklık dağılımları

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Farklı ızgara yüksekliklerinde tencereye çarpan alevin, yapısı ve sıcaklığının değişiminin karbon emisyonlarına olan etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 2 farklı deney düzeneği kullanılmıştır. Rayleigh Termometresi ile farklı ızgara yüksekliğinde ocak beklerinden çıkan alevin sıcaklıkları ölçülmüştür. Gaz analizörüyle de farklı ızgara yüksekliklerindeki CO emisyonları belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Ev tipi bir ocak yakıcısında doğal gazın yanması sonucu 700-2000 K arasında değişen sıcaklıklar ölçülmüştür. Sıcaklıkların alevin stokiometrik bölgesinde en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür.
- Tencere yüksekliğinin artmasıyla emisyon değerlerinin azaldığı görülmüştür. Yakıtın daha fazla hava ile temas etmesi sağlanmıştır. Yakıt-hava karışımının iyi olması yanma sonu emisyonları iyileşmiştir. Ancak alev tencereye varmadan soğuduğu için tencereye aktarılan ısı azalmıştır.
- Tencere yüksekliği azaldıkça, alev yüzeyinin tencereye olan teması artmıştır. Tencereye aktarılan ısı miktarı artmış, tencere tabanında ısının yayılımı daha uniform hale gelmiştir.
- Ev tipi bir bekte moleküler boyutta alev sıcaklığı ölçümü Rayleigh termometresi ile yapılmıştır. Her bir tencere yüksekliğinde alınan düzlemlerin sıcaklık dağılımına bakıldığında beke en yakın bölge olan $L=1$ konumunda sitokiyometrik oranın tam sağlanmaması nedeniyle alevin soğuk olduğu

görülmüştür. L=5 konumundan alınan düzlem kesitinde ise alevin tam yanma tepkimesi gerçekleşmiş, böylece de alev sıcaklıkları artmıştır. Rayleigh termometresi ile alınan ölçümlerin genel sonuçlarına baktığımızda lazer ile ölçüm sisteminin getirdiği kısıtlardan dolayı istenildiği gibi temiz görüntüler oluşmamıştır ancak bu çalışma bundan sonra yapılacak çalışmalara öncülük edecektir.

- Nümerik çalışmalarda, kullanılan sayısal çözümleme metodu, akış hacmi, çözüm ağı ile istenilen sonuçlar alınmıştır. Farklı tencere yüksekliklerindeki alev sıcaklıklarına bakıldığında, maksimum ve minimum sıcaklıklarda büyük fark yoktur. Ancak alev yapılarının farkı görülmektedir. Düşük tencere yüksekliklerinde alev, tencere tabanına yayılmış; tencere yüksekliği arttıkça alevin tencereye temas ettiği alan azalmıştır.
- Deneysel ve nümerik çalışmalara göre farklı tencere yüksekliklerindeki maksimum ve minimum sıcaklıklar çok büyük farklar göstermemektedir. Bu da alev sıcaklıklarından daha çok alev cephesinin tencereye olan temasının emisyonlar üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] TUSİAD, 21. Yüzyıla Girenken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi, Aralık 1998.
- [2] BP Dünya Enerji İstatistikleri Raporu, (2015) "Statistical Review of World Energy", Haziran 2015.
- [3] European Commission, Joint Research Centre, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publications>, Haziran 2015.
- [4] Çengel, Y.A. & Boles, M.A. (2006). Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th edition. McGraw- Hill.
- [5] Gattei L. , (2008). A Study On The Fluid Dynamics Of Domestic Gas Burners, Disegno E Metodi Dell'ingegneria Industriale.
- [6] Sandalci T., <http://www.yildiz.edu.tr/~sandalci/dersnotu/TC/TC3.pdf>, 4 Kasım 2015.
- [7] Ta-Hui Lin ve Yung-Chang Ko, (2003). "Emissions and Efficiency of a Domestic Gas Stove Burning Natural Gases with Various Compositions", Energy Conversion and Management, 44: 3001–3014.
- [8] Hou, Lin, Lee, (2007). "Efficiency and emissions of a new domestic gas burner with a swirling flame", Energy Conversion and Management, 48:1401-1410.
- [9] Leung C.W., Probert S.D., Li H.B. (2006). "Thermal Performances and CO Emissions of Gas-Fired Cooker-Top Burners", Applied Energy, 83:1326-1338.
- [10] Hou S.S. ve Ko Y.C., (2004). "Effects of heating height on flame appearance, temperature field and efficiency of an impinging laminar jet flame used in domestic gas stoves", Energy Conversion and Management., 45:1583-1595.
- [11] Zao F.Q., Hiroyasu H., (1993). The Applications of Laser Rayleigh Scattering to Combustion Diagnostics", Prog. Energy Combustion. Sci, 19:447-485.
- [12] Dynamic Studio User's Guide, (2010), 476-484.
- [13] Domestic Cooking Appliances Burning Gas, BS-EN- 30-1-1:2008+ A1 2010, 26 Ağustos 2010.
- [14] Ansys Fluent Kullanıcı Rehberi, ANSYS Inc 2015.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Beria Işık CANTÜRK
Doğum Tarihi ve Yeri : 13.11.1990 / AYDIN
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : isik.canturk@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Isı-Proses	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lise	Fen Bilimleri	Aydın Adnan Menderes A.L	2008

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
10.2013-Devam ediyor	Arçelik A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi
04.2013-06.2013	Arçelik A.Ş.	Bitirme Tezi Öğrencisi
06.2012-09.2012	Arçelik A.Ş.	Uzun Dönem Yaz Stajyeri

YAYINLARI

Bildiri

1. B.I. Cantürk, Ö. Ağra, "Flame Temperature Measurements Using Rayleigh Thermometry", International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME15), YTÜ, İstanbul, 469-474.